OCTAVA EDICIÓN

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

PEARSON Prentice Hall ®

AUDESIRK AUDESIRK BYERS

VISIT…

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

OCTAVA EDICIÓN

Teresa Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Gerald Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Bruce E. Byers
University of Massachusetts, Amherst

TRADUCCIÓN

Augusta Victoria Flores Flores
Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Vicente Gerardo Hernández Hernández
Preparatoria de la Universidad La Salle

Paula Cortés García
Colegio Gimnasio del Norte
Bogotá, Colombia

Víctor Hugo Blanco Lozano
ITESM Campus Puebla

PEARSON Educación ®

Datos de catalogación bibliográfica

AUDESIRK TERESA; AUDESIRK GERALD; BYERS, BRUCE E.
Biología: La vida en la Tierra

Pearson Educación de México, 2008

ISBN 978-970-26-1194-3
Área: Ciencias

Formato 21 × 27 Páginas: 1024

Authorized translation from the English Language edition, entitled *Biology: Life on earth with physiology, 8th Edition* by *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk and Bruce E. Byers*, published by Pearson Education Inc., publishing as PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. All rights reserved.
Versión en español de la obra titulada *Biology: Life on earth with physiology, 8ª edición,* de *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk y Bruce E. Byers*, publicada originalmente en inglés por Pearson Education Inc., publicada como PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. Todos los derechos reservados.

ISBN 0-13-195766-X

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor:	Enrique Quintanar Duarte
e-mail:	enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo:	Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción:	Rodrigo Romero Villalobos

OCTAVA EDICIÓN, 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atlacomulco Núm. 500, 5° Piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN 10: 970-26-1194-6
ISBN 13: 978-970-26-1194-3

Impreso en México. *Printed in Mexico.*
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

PEARSON Educación

Edición en inglés

Editor: Jeff Howard
Development Editor: Anne Scanlan-Rohrer
Production Editor: Tim Flem/PublishWare
Media Editor: Patrick Shriner
Executive Managing Editor: Kathleen Schiaparelli
Editor in Chief of Development: Carol Trueheart
Media Production: nSight
Managing Editor, Science Media: Rich Barnes
Director of Marketing: Patrick Lynch
Marketing Assistant: Jessica Muraviov
Director of Creative Services: Paul Belfanti
Creative Director: Juan Lopez
Art Director: John Christiana
Interior Design: Maureen Eide
Cover Designers: Maureen Eide and John Christiana
Page Composition: PublishWare
Manufacturing Manager: Alexis Heydt-Long
Buyer: Alan Fischer
Senior Managing Editor, Art Production and Management: Patricia Burns
Manager, Production Technologies: Matthew Haas
Managing Editor, Art Management: Abigail Bass
Art Development Editor: Jay McElroy
Art Production Editor: Rhonda Aversa
Manager, Art Production: Sean Hogan
Assistant Manager, Art Production: Ronda Whitson
Illustrations: ESM Art Production; Lead Illustrators: Daniel Knopsnyder, Stacy Smith, Nathan Storck; Imagineering; Stephen Graepel
Cartographer: GeoNova, LLC
Assistant Managing Editor, Science Supplements: Karen Bosch
Editorial Assistant: Gina Kayed
Production Assistant: Nancy Bauer
Director, Image Resource Center: Melinda Reo
Manager, Rights and Permissions: Zina Arabia
Interior Image Specialist: Beth Boyd Brenzel
Cover Image Specialist: Karen Sanatar
Image Permission Coordinator: Debbie Latronica
Photo Researcher: Yvonne Gerin
Cover Photograph: Rockhopper Penguins; The Neck, Saunders Island, Falkland Islands, by Laura Crawford Williams

Resumen de Contenido

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20
3 Moléculas biológicas 36
4 Estructura y función de la célula 56
5 Estructura y función de la membrana celular 80
6 Flujo de energía en la vida de una célula 100
7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116
8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

UNIDAD 2 Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148
10 Expresión y regulación de los genes 166
11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190
12 Patrones de herencia 220
13 Biotecnología 250

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276
15 Cómo evolucionan los organismos 294
16 El origen de las especies 314
17 Historia de la vida 330
18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356
19 La diversidad de los procariotas y los virus 370
20 La diversidad de los protistas 386
21 La diversidad de las plantas 402
22 La diversidad de los hongos 422
23 Diversidad animal I:Invertebrados 440
24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488
26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512
27 Interacciones de la comunidad 536
28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558
29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580
30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

UNIDAD 5 Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634
32 Circulación 648
33 Respiración 668
34 Nutrición y digestion 684
35 El sistema urinario 706
36 Defensas contra la enfermedad 720
37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740
38 El sistema nervioso y los sentidos 760
39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796
40 Reproducción animal 814
41 Desarrollo animal 836

UNIDAD 6 Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858
43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886
44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

Ensayos

GUARDIÁN DE LA TIERRA

¿Por qué devemos preservar la biodiversidad? 12
Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
Hibridación y extinción 322
El caso de las setas que desaparecen 435
Ranas en peligro 476
¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566
Los polos en peligro 576
El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586
Restauración de los Everglades 616
Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva 618
En defensa de las tortugas marinas 621
Recuperación de un depredador clave 624
Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629
Engaño endocrino 754
Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878
Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

GUARDIÁN DE LA SALUD

El colesterol, aliado y enemigo 47
¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
Diagnóstico genético prenatal 268
Al rescate de los corazones enfermos 654
Fumar: una decisión de vida 678
Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687
Las úlceras digieren el tracto digestivo 699
Cuando los riñones fallan 714
El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
Como se repara un hueso fracturado 808
Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810
Enfermedades de transmisión sexual 828
Reproducción con alta tecnología 831
La placenta sólo brinda una protección parcial 852
¿Eres alérgico al polen? 890

DE CERCA

Un asunto peliagudo 52
Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124
Glucólisis 136
Reacciones de la matríz mitocondrial 141
Estructura y duplicación del DNA 159
La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
El principio de Hardy-Weinberg 298
Especiación por mutación 326
Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
¿Cómo se replican los virus? 382
Las branquias y los gases: Un intercambio contracorriente 674
Las nefronas y la formación de orina 712
Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
El control hormonal del ciclo menstrual 826
¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Experimentos controlados, antes y ahora 6
La radiactividad en la investigación 24
En busca de la célula 64
El descubrimiento de las acuaporinas 89
El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El descubrimiento de la doble hélice 156
El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Fibrosis quística 234
Aguas termales y la ciencia del calor 256
Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282
¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas 365
Hormigas y acacias: Una asociación ventajosa 549
El descubrimiento de las vacunas 732
Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780
En busca de un anticonceptivo masculino 832
La promesa de las células madre 843
¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912

GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA

Arroz dorado 267

ENLACES CON LA VIDA

La vida que nos rodea 14
¿Alimentación saludable? 29
¿Alimentos sintéticos? 41
Huéspedes indeseables 77
La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113
Tú vives gracias a las plantas 129
Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
Genética, evolución y medicina 178
Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
Los nombres científicos y la vanidad 328
Un mundo pequeño 367
Comensales indeseables 378
Recolecta con cuidado 436
Ayudantes de cirujanos 454
¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483
Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533
Es posible hacer una diferencia 577
¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591
¿Qué pueden hacer los individuos? 630
¿Calor o humedad? 637
Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680
¿Demasiado líquido para beber? 717
Más cerca de la cura de la diabetes 756
Caminar con un perro 811
¿Por qué el parto es tan difícil? 854

CONEXIONES EVOLUTIVAS

Patas del caribú y diversidad de membranas 96
Los científicos no ponen en duda la evolución 326
Nuestros ancestros unicelulares 400
El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
¿Por qué juegan los animales? 508
¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554
La evolución de las hormonas 756
Sentidos poco comunes 790
Adaptaciones especiales de raices, tallos y hojas 880

Contenido

Prefacio xxiii

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿Y en algún otro lugar? 1

1.1 ¿Cómo estudian la vida los científicos? 2

La vida puede estudiarse en diferentes niveles de organización 2

Los principios científicos fundamentan toda investigación científica 3

El método científico es la base de la investigación científica 4

La comunicación es esencial para la ciencia 5

La ciencia es un esfuerzo humano 5

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Experimentos controlados, antes y ahora 6

Las teorías científicas se han probado una y otra vez 8

1.2 Evolución: La teoría unificadora de la biología 9

Tres procesos naturales sustentan la evolución 9

1.3 ¿Cuáles son las características de los seres vivos? 10

Los seres vivos son complejos, están organizados y se componen de células 11

Los seres vivos mantienen condiciones internas relativamente constantes mediante la homeostasis 11

GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Por qué debemos preservar la biodiversidad? 12

Los seres vivos responden ante estímulos 13

Los seres vivos obtienen y usan materiales y energía 13

ENLACES CON LA VIDA La vida que nos rodea 14

Los seres vivos crecen 14

Los seres vivos se reproducen 14

En conjunto, los seres vivos poseen la capacidad de evolucionar 14

1.4 ¿Cómo clasifican los científicos en categorías la diversidad de los seres vivos? 14

Los dominios Bacteria y Archaea están constituidos por células; el dominio Eukarya se compone de células eucarióticas 14

Los dominios Bacteria y Archaea, así como los miembros del reino Protista, son principalmente unicelulares; los miembros de los reinos Fungi, Plantae y Animalia son básicamente multicelulares 15

Los miembros de los distintos reinos tienen formas diferentes de obtener energía 15

1.5 ¿Cómo ilumina la vida diaria el conocimiento de la biología? 15

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿y en algún otro lugar? 17

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20

ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 21

2.1 ¿QUÉ SON LOS ÁTOMOS? 22

Los átomos, las unidades estructurales fundamentales de la materia, se componen de partículas aún más pequeñas 22

2.2 ¿CÓMO INTERACTÚAN LOS ÁTOMOS PARA FORMAR MOLÉCULAS? 23

Los átomos interactúan con otros átomos cuando hay vacíos en sus capas de electrones más externas 23

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La radiactividad en la investigación 24

Los átomos con carga, llamados iones, interactúan para formar enlaces iónicos 25

Los átomos sin carga pueden estabilizarse compartiendo electrones para formar enlaces covalentes 26

Los puentes de hidrógeno son atracciones eléctricas entre las moléculas que tienen enlaces covalentes polares o dentro de éstas 28

2.3 ¿Por qué el agua es tan importante para la vida? 28

El agua interactúa con muchas otras moléculas 28

ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentación saludable? 29

Las moléculas de agua tienden a mantenerse unidas 30

Las soluciones en agua pueden ser ácidas, básicas y neutras 31

El agua modera los efectos de los cambios de temperatura 32

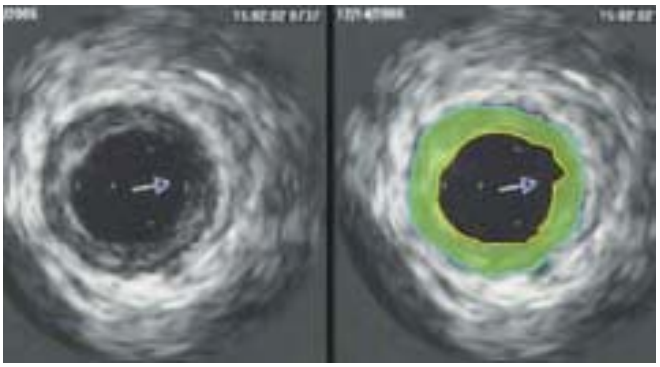
El agua forma un sólido singular: El hielo 32

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 33

3 Moléculas biológicas 36

ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 37

3.1 ¿Por qué el carbono es tan importante en las moléculas biológicas? 38



3.2 ¿Cómo se sintetizan las moléculas orgánicas? 38
Las moléculas biológicas se unen o se desintegran agregando o eliminando agua 39

3.3 ¿Qué son los carbohidratos? 39
Hay diversos monosacáridos con estructuras ligeramente distintas 39
ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentos sintéticos? 41
Los disacáridos consisten en dos azúcares simples que se enlazan mediante síntesis por deshidratación 41
Los polisacáridos son cadenas de azúcares simples 42

3.4 ¿Qué son los lípidos? 44
Los aceites, las grasas y las ceras son lípidos que sólo contienen carbono, hidrógeno y oxígeno 44
Los fosfolípidos tienen "cabezas" solubles en agua y "colas" insolubles en agua 46
Los esteroides consisten en cuatro anillos de carbono fusionados 46
GUARDIÁN DE LA SALUD El colesterol, aliado y enemigo 47

3.5 ¿Qué son las proteínas? 47
Las proteínas se forman a partir de cadenas de aminoácidos 48
Los aminoácidos se unen para formar cadenas mediante síntesis por deshidratación 49
Una proteína puede tener hasta cuatro niveles de estructura 49
Las funciones de las proteínas están ligadas a sus estructuras tridimensionales 51
DE CERCA Un asunto peliagudo 52

3.6 ¿Qué son los ácidos nucleicos? 53
El DNA y el RNA (las moléculas de la herencia) son ácidos nucleicos 53
Otros nucleótidos actúan como mensajeros intracelulares y portadores de energía 53

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 54

4 Estructura y función de la célula 56

ESTUDIO DE CASO Repuestos para cuerpos humanos 57

4.1 ¿Qué es la teoría celular? 59

4.2 ¿Cuáles son las características básicas de las células? 59
Las funciones de las células limitan su tamaño 59
Todas las células tienen características comunes 59
Hay dos tipos básicos de células: procarióticas y eucarióticas 62

4.3 ¿Cuáles son las características principales de las células eucarióticas? 63
El citoesqueleto brinda forma, soporte y movimiento 63
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de la célula 64
Los cilios y flagelos mueven a la célula o a los líquidos para que éstos pasen por la célula 67
El núcleo es el centro de control de la célula eucariótica 67
El citoplasma eucariótico incluye un complejo sistema de membranas 70
Las vacuolas desempeñan muchas funciones, como regulación del agua, soporte y almacenamiento 72
Las mitocondrias extraen energía de las moléculas de alimento y los cloroplastos captan la energía solar 73
Las plantas utilizan plástidos para almacenamiento 74

4.4 ¿Cuáles son las características principales de las células procarióticas? 75
Las células procarióticas son pequeñas y poseen características superficiales especializadas 75
Las células procarióticas tienen menos estructuras especializadas dentro del citoplasma 76
ENLACES CON LA VIDA Huéspedes indeseables 77

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Respuestas para cuerpos humanos 77

5 Estructura y función de la membrana celular 80

ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 81

5.1 ¿Qué relación hay entre la estructura de una membrana celular y su función? 82
Las membranas celulares aíslan el contenido de la célula mientras permiten la comunicación con el ambiente 82
Las membranas son "mosaicos fluidos" en los que las proteínas se mueven dentro de las capas de lípidos 82
La bicapa de fosfolípidos es la porción fluida de la membrana 83
Una variedad de proteínas forman un mosaico dentro de la membrana 84

5.2 ¿Cómo logran las sustancias atravesar las membranas? 85
Las moléculas de los fluidos se mueven en respuesta a los gradientes 85
El movimiento a través de las membranas se efectúa mediante transporte pasivo y activo 86
El transporte pasivo incluye difusión simple, difusión facilitada y ósmosis 86
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las acuaporinas 89
El transporte activo utiliza energía para mover moléculas en contra de sus gradientes de concentración 91
Las células absorben partículas o fluidos mediante endocitosis 92
La exocitosis saca materiales de la célula 94
El intercambio de materiales a través de las membranas influye en el tamaño y la forma de la célula 94

5.3 ¿Cómo las uniones especializadas permiten a las células establecer conexiones y comunicarse? 95
Los desmosomas unen las células 95
Las uniones estrechas impiden las filtraciones en las células 95
Las uniones en hendidura y los plasmodesmos permiten la comunicación entre células 96

CONEXIONES EVOLUTIVAS Patas de caribú y diversidad de membranas 96

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 97

6 Flujo de energía en la vida de una célula 100

ESTUDIO DE CASO Energía liberada 101

6.1 ¿Qué es energía? 102
- Las leyes de la termodinámica describen las propiedades básicas de la energía 102
- Los seres vivos utilizan la energía de la luz solar para crear las condiciones de baja entropía de la vida 103

6.2 ¿Cómo fluye la energía en las reacciones químicas? 103
- Las reacciones exergónicas liberan energía 104
- Las reacciones endergónicas requieren un aporte neto de energía 105
- Las reacciones acopladas enlazan reacciones endergónicas y exergónicas 105

6.3 ¿Cómo se transporta energía celular entre reacciones acopladas? 105
- El ATP es el principal portador de energía en las células 105
- Los portadores de electrones también transportan energía dentro de las células 107

6.4 ¿Cómo controlan las células sus reacciones metabólicas? 108
- A temperaturas corporales, las reacciones espontáneas son demasiado lentas para sustentar la vida 108
- Los catalizadores reducen la energía de activación 108
- Las enzimas son catalizadores biológicos 108
- Las células regulan el metabolismo al controlar las enzimas 110
- Los venenos, las drogas y el ambiente influyen en la actividad de las enzimas 111
- ENLACES CON LA VIDA La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Energía liberada 113

7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116

ESTUDIO DE CASO ¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 117

7.1 ¿Qué es la fotosíntesis? 118
- Las hojas y los cloroplastos son adaptaciones para la fotosíntesis 118
- La fotosíntesis consiste en reacciones dependientes e independientes de la luz 119

7.2 Reacciones dependientes de la luz: ¿Cómo se convierte la energía luminosa en energía química? 120
- Durante la fotosíntesis, los pigmentos de los cloroplastos captan primero la luz 120
- Las reacciones dependientes de la luz se efectúan dentro de las membranas tilacoideas 121
- DE CERCA Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124

7.3 Reacciones independientes de la luz: ¿Cómo se almacena la energía química en las moléculas de glucosa? 125
- El ciclo C_3 capta dióxido de carbono 125
- El carbono fijado durante el ciclo C_3 se utiliza para sintetizar glucosa 126

7.5 Agua, CO_2 y la vía C_4 127
- Cuando los estomas se cierran para conservar agua se lleva a cabo la derrochadora fotorrespiración 127
- Las plantas C4 reducen la fotorrespiración mediante un proceso de fijación de carbono en dos etapas 129
- Las plantas C3 y C4 se adaptan a condiciones ambientales diferentes 129
- ENLACES CON LA VIDA Tú vives gracias a las plantas 129

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 130

8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿tienen éxito quienes engañan? 133

8.1 ¿Cómo obtienen energía las células? 134
- La fotosíntesis es la última fuente de energía celular 134
- La glucosa es una molécula clave en el almacenamiento de energía 134
- Descripción general de la descomposición de la glucosa 134

8.2 ¿Cómo se capta la energía de la glucosa durante la glucólisis? 135
- La glucólisis "descompone" la glucosa en piruvato y libera energía química 135
- En ausencia de oxígeno, la fermentación sigue a la glucólisis 135
- DE CERCA Glucólisis 136

8.3 ¿Cómo logra la respiración celular captar energía adicional de la glucosa? 138
- La respiración celular en las células eucarióticas se realiza en las mitocondrias 138
- ENLACES CON LA VIDA Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
- El piruvato se descompone en la matriz mitocondrial liberando más energía 139
- Los electrones de alta energía viajan a través de la cadena de transporte de electrones 140
- DE CERCA Reacciones de la matríz mitocondrial 141
- La quimiósmosis capta la energía almacenada en un gradiente de iones hidrógeno y produce ATP 141

8.4 Recapitulación 142
Un resumen de la descomposición de la glucosa en las células eucarióticas 142
La glucólisis y la respiración celular influyen en el funcionamiento de los organismos 142
GUARDIÁN DE LA SALUD ¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿Tienen éxito quienes engañan? 145

UNIDAD 2
Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148

ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 149
9.1 ¿Cómo descubrieron los científicos que los genes están compuestos de DNA? 150
La transformación bacteriana pone de manifiesto el vínculo entre los genes y el DNA 150
9.2 ¿Cuál es la estructura del DNA? 151
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El DNA se compone de cuatro nucleótidos 154
El DNA es una doble hélice de dos cadenas de nucleótidos 154
Los puentes de hidrógeno entre bases complementarias mantienen unidas las dos cadenas de DNA 154
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de la doble hélice 156
9.3 ¿Cómo codifica el DNA la información? 157
9.4 ¿Cómo logra la duplicación del DNA asegurar la constancia genética durante la división celular? 157
La duplicación del DNA es un acontecimiento fundamental en la vida de una célula 157
La duplicación del DNA produce dos moléculas de DNA idénticas, cada una con una cadena original (parental) y otra nueva (cadena hija) 157

9.5 ¿Cómo ocurren las mutaciones? 158
DE CERCA Estructura y duplicación del DNA 159
La duplicación exacta y la corrección del DNA permiten lograr una duplicación del DNA casi libre de errores 162
A veces se producen errores 163
Las mutaciones van desde cambios en pares de nucleótidos solos hasta movimientos de grandes segmentos de cromosomas 163
Las mutaciones pueden tener varios efectos en la función 163
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 163

10 Expresión y regulación de los genes 166

ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 167
10.1 ¿Cuál es la relación entre los genes y las proteínas? 168
La mayoría de los genes contienen información para la síntesis de una sola proteína 168
El DNA da las instrucciones para la síntesis de proteínas mediante intermediarios de RNA 169
Perspectiva general: La información genética se transcribe al RNA y se traduce en proteínas 170
El código genético utiliza tres bases para especificar un aminoácido 171
10.2 ¿Cómo se transcribe la información de un gen al RNA? 172
La transcripción se inicia cuando la RNA polimerasa se une al promotor de un gen 172
El alargamiento prosigue hasta que la RNA polimerasa llega a una señal de terminación 172
10.3 ¿Cómo se traduce la secuencia de bases de una molécula de RNA mensajero a proteínas?
El RNA mensajero transporta el código para la síntesis de proteínas del DNA a los ribosomas 173
Los ribosomas consisten en dos subunidades, cada una compuesta de RNA ribosómico y proteínas 176
Las moléculas de RNA de transferencia descifran la secuencia de bases del RNAm para obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína 176
Durante la traducción, el RNAm, el RNAt y los ribosomas cooperan para sintetizar proteínas 176
Recapitulación: Para descifrar la secuencia de bases del DNA y obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína son necesarias la transcripción y la traducción 176
ENLACES CON LA VIDA Genética, evolución y medicina 178
10.4 ¿Cómo influyen las mutaciones del DNA en la función de los genes? 178
Las mutaciones tienen diversos efectos en la estructura y función de las proteínas 179
Inversiones y translocaciones 179
Deleciones e inserciones 179
Sustituciones 179
DE CERCA La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
Las mutaciones suministran la materia prima de la evolución 180
10.5 ¿Cómo se regulan los genes? 180
La regulación de los genes en los procariotas 181
La regulación de los genes en los eucariotas 182

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Las células eucarióticas regulan la transcripción de genes individuales, regiones de cromosomas o cromosomas enteros 183
GUARDIÁN DE LA SALUD Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 186

11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 191

11.1 ¿Cuál es la función de la reproducción celular en la vida de células individuales y de organismos completos? 192
El ciclo celular procariótico consiste en crecimiento y fisión binaria 193
El ciclo celular eucariótico consiste en la interfase y la división celular 194

11.2 ¿Cómo se organiza el dna en los cromosomas de las células eucarióticas? 195
El cromosoma eucariótico consiste en una molécula de DNA lineal unida a proteínas 195
Los cromosomas eucarióticos se presentan habitualmente en pares homólogos con información genética similar 197

11.3 ¿Cómo se reproducen las células por división celular mitótica? 199
Durante la profase los cromosomas se condensan y los microtúbulos del huso se forman y se unen a los cromosomas 200
Durante la metafase los cromosomas se alinean a lo largo del ecuador de la célula 200
Durante la anafase las cromátidas hermanas se separan y son atraídas hacia polos opuestos de la célula 200
Durante la telofase la envoltura nuclear se forma alrededor de ambos grupos de cromosomas 200
Durante la citocinesis el citoplasma se divide entre dos células hijas 200
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Los puntos de control regulan el progreso durante el ciclo celular 204
La actividad de enzimas específicas impulsa el ciclo celular 204
Mecanismos de regulación sobre los puntos de control 205

11.5 ¿Por qué tantos organismos se producen sexualmente? 206
Las mutaciones de DNA son la fuente última de la variabilidad genética 206
La reproducción sexual puede combinar diferentes alelos progenitores en un solo descendiente 207

11.6 ¿Cómo la división celular meiótica produce células haploides? 207
La meiosis separa los cromosomas homólogos y produce núcleos hijos haploides 207
GUARDIÁN DE LA SALUD Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
La división celular meiótica seguida por la fusión de gametos mantiene constante el número de cromosomas de una generación a otra 209
La meiosis I separa los cromosomas homólogos en dos núcleos haploides hijos 209
La meiosis II separa las cromátidas hermanas en cuatro núcleos hijos 213

11.7 ¿Cuándo ocurren la división celular meiótica y mitótica en el ciclo de la vida de los eucariotas? 213
En los ciclos de vida haploides, la mayoría del ciclo consta de células haploides 214
En los ciclos de vida diploides la mayoría del ciclo consiste en células diploides 215
En la alternancia del ciclo de vida de las generaciones, hay tanto etapas multicelulares haploides como diploides 215

11.8 ¿De qué forma la meiosis y la reproducción sexual originan variabilidad genética? 216
La redistribución de homólogos crea combinaciones nuevas de cromosomas 216
El entrecruzamiento crea cromosomas con combinaciones nuevas de genes 217
La fusión de gametos aporta más variabilidad genética a la descendencia 217
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 217

12 Patrones de herencia 220

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita en la cancha 221

12.1 ¿Cuál es la base física de la herencia? 222
Los genes son secuencias de nucleótidos en lugares específicos dentro de los cromosomas 222
Los dos alelos de un organismo pueden ser iguales o diferentes 222

12.2 ¿Cómo estableció Gregor Mendel los cimientos de la genética moderna? 222
Hacer bien las cosas: Los secretos del éxito de Mendel 222

12.3 ¿Cómo se heredan los rasgos individuales? 223

La hipótesis de Mendel sirve para predecir el resultado de nuevos tipos de cruzas de rasgos individuales 226

12.4 ¿Cómo se heredan los rasgos múltiples? 227
Mendel planteó la hipótesis de que los rasgos se heredan de forma independiente 227
En un mundo no preparado, el genio podría pasar inadvertido 228

12.5 ¿Cómo se heredan los genes localizados en un mismo cromosoma? 229
Los genes que están en un mismo cromosoma tienden a heredarse juntos 229
La recombinación crea nuevas combinaciones de alelos ligados 230

12.6 ¿Cómo se determina el sexo y cómo se heredan los genes ligados a los cromosomas sexuales? 231
Los genes ligados a los cromosomas sexuales se encuentran sólo en el cromosoma *X* o sólo en el cromosoma *Y* 231

12.7 ¿Las leyes mendelianas de la herencia se aplican a todos los rasgos? 233
Dominancia incompleta: el fenotipo de los heterocigotos es un intermedio entre los fenotipos de los homocigotos 233
Un solo gen puede tener múltiples alelos 233
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Fibrosis quística 234
Muchos rasgos reciben influencia de varios genes 235
Los genes individuales comúnmente tienen múltiples efectos en el fenotipo 235
El ambiente influye en la expresión de los genes 237

12.8 ¿Cómo se investigan las anomalías genéticas humanas? 237

12.9 ¿Cómo se heredan las anomalías humanas originadas por genes individuales? 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos recesivos 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos dominantes 239
Algunas anomalías humanas están ligadas a los cromosomas sexuales 240

12.10 ¿Cómo afectan a los seres humanos los errores en el número de cromosomas? 240
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de cromosomas sexuales 241
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de autosomas 243

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Muerte súbita en la cancha 244

13 Biotecnología 250

ESTUDIO DE CASO ¿Culpable o inocente? 251

13.1 ¿Qué es la biotecnología? 252

13.2 ¿Cómo se recombina el DNA en la naturaleza? 252

13.3 ¿Cómo se emplea la biotecnología en la ciencia forense? 254
La reacción en cadena de la polimerasa amplifica una secuencia específica de DNA 254
La elección de los iniciadores determina cuáles secuencias de DNA se amplifican 255
La electroforesis en gel separa los segmentos del DNA 256
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Aguas termales y la ciencia del calor 256
Las sondas de DNA se emplean para etiquetar secuencias de nucleótidos específicas 257
Cada individuo tiene su propio perfil de DNA 258

13.4 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en la agricultura? 258
Muchos cultivos se modifican genéticamente 258
Las plantas genéticamente modificadas sirven para elaborar medicamentos 260
Los animales genéticamente modificados pueden ser de utilidad en agricultura y en medicina 261

13.5 ¿Cómo se emplea la biotecnología para aprender sobre el genoma humano? 261

13.6 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en el diagnóstico médico y en el tratamiento de las enfermedades? 262
La tecnología del DNA puede emplearse para diagnosticar trastornos hereditarios 262
La tecnología del DNA ayuda a tratar las enfermedades 264

13.7 ¿Cuáles son las principales implicaciones éticas de la biotecnología moderna? 265
ENLACES CON LA VIDA Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
¿Deberían permitirse en la agricultura los organismos genéticamente modificados? 266
GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA Arroz dorado 267
GUARDIÁN DE LA SALUD Diagnóstico genético prenatal 268
¿Debería cambiarse el genoma humano con la biotecnología? 270

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tan útiles son las muelas del juicio? 277

14.1 ¿Cómo se desarrollaron las ideas sobre la evolución? 278
- Los primeros estudios de biología no incluían el concepto de evolución 278
- La exploración de nuevos territorios reveló una sorprendente diversidad de la vida 279
- Algunos científicos especularon que la vida había evolucionado 279
- Los descubrimientos de fósiles demostraron que la vida había cambiado a lo largo del tiempo 279
- Algunos científicos idearon explicaciones no evolutivas a partir de los fósiles 280
- La geología ofreció la evidencia de que la Tierra es sumamente antigua 280
- Algunos biólogos anteriores a Darwin propusieron mecanismos de evolución 281
- Darwin y Wallace describieron un mecanismo de evolución 281
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282

14.2 ¿Cómo sabemos que ha habido evolución? 282
- Los fósiles ofrecen evidencias del cambio evolutivo al paso del tiempo 283
- La anatomía comparada ofrece evidencia de que la descendencia ha sufrido modificaciones 283
- Las etapas embrionarias de los animales sugieren la existencia de antepasados comunes 286
- Los análisis bioquímicos y genéticos modernos ponen de manifiesto el parentesco entre diversos organismos 286

14.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 288
- La teoría de Darwin y Wallace se basa en cuatro postulados 288
- Postulado 1: Las poblaciones varían 288
- Postulado 2: Los rasgos se heredan 289
- Postulado 3: Algunos individuos no logran sobrevivir y reproducirse 289
- Postulado 4: El éxito reproductivo no es aleatorio 289
- La selección natural modifica las poblaciones al paso del tiempo 289

14.4 ¿Qué pruebas se tienen de que las poblaciones evolucionan por selección natural? 289
- La reproducción controlada modifica los organismos 289
- La evolución por selección natural ocurre en la actualidad 290

14.5 Epílogo de Charles Darwin 292

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Qué tan útiles son las muelas del juicio 292

15 Cómo evolucionan los organismos 294

ESTUDIO DE CASO Evolución de una amenaza 295

15.1 ¿Cómo se relacionan las poblaciones, los genes y la evolución? 296
- La evolución es el cambio de la frecuencia de alelos dentro de una población 297
- La población en equilibrio es una población hipotética donde no ocurre la evolución 297
- DE CERCA El principio de Hardy-Weinberg 298

15.2 ¿Qué causa la evolución? 298
- Las mutaciones son la fuente original de la variabilidad genética 298
- El flujo de genes entre poblaciones cambia las frecuencias de alelos 300
- Las frecuencias de alelos pueden cambiar en poblaciones pequeñas 300
- El apareamiento dentro de una población casi nunca es fortuito 304
- No todos los genotipos son igualmente benéficos 304

15.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 306
- La selección natural es en realidad una reproducción diferencial 306
- La selección natural actúa sobre los fenotipos 306
- Algunos fenotipos se reproducen con mayor éxito que otros 306
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
- La selección influye en las poblaciones de tres formas 309

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Evolución de una amenaza 311

16 El origen de las especies 314

ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 315

16.1 ¿QUÉ ES UNA ESPECIE? 316
- Los biólogos necesitan una clara definición de especie 316
- Las especies son grupos de poblaciones que se cruzan entre sí 316
- La apariencia resulta engañosa 316

16.2 ¿Cómo se conserva el aislamiento reproductivo entre las especies? 317
- Los mecanismos de aislamiento anteriores al apareamiento impiden que especies diferentes se apareen 317
- Los mecanismos de aislamiento posteriores al apareamiento limitan la descendencia híbrida 319

16.3 ¿Cómo se forman nuevas especies? 320
- La separación geográfica de una población conduce a la especiación alopátrica 321
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Hibridación y extinción 322
- El aislamiento ecológico de una población conduce a la especiación simpátrica 322
- En ciertas condiciones, pueden surgir muchas nuevas especies 324

16.4 ¿A qué se debe la extinción? 324
La distribución localizada y la especialización excesiva aumentan la vulnerabilidad de las especies ante los cambios ambientales 324
Las interacciones con otros organismos pueden llevar a una especie a su extinción 325
DE CERCA Especiación por mutación 326
El cambio y la destrucción del hábitat son las causas principales de la extinción 326
CONEXIONES EVOLUTIVAS Los científicos no ponen en duda la evolución 326
ENLACES CON LA VIDA Los nombres científicos y la vanidad 328
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 328

17 Historia de la vida 330

ESTUDIO DE CASO Gente pequeña, historia grande 331
17.1 ¿Cómo empezó la vida? 332
Los experimentos refutaron la generación espontánea 332
Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos 332
El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse 334
Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas 334
Pero, ¿realmente sucedió todo esto? 334
17.2 ¿Cómo eran los primeros organismos? 335
Los primeros organismos fueron procariotas anaerobios 335
Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar 337
La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera 337
El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno 337
Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas 337
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
17.3 ¿Cómo eran los primeros organismos multicelulares? 339
Algunas algas se volvieron multicelulares 340
La diversidad animal surgió en la era precámbrica 340
17.4 ¿Cómo llegó la vida a la tierra firme? 340
17.5 ¿Cuál ha sido el papel de la extinción en la historia de la vida? 344
La historia de la evolución ha estado marcada por extinciones periódicas en masa 345
El cambio climático contribuyó con las extinciones en masa 345
Los sucesos catastróficos pudieron haber causado las peores extinciones en masa 346
17.6 ¿Cómo evolucionaron los seres humanos? 346
Los seres humanos heredaron algunas adaptaciones de antiguos primates para vivir en los árboles 346
Los fósiles del homínido más antiguo provienen de África 347
Los homínidos más antiguos podían mantenerse en pie y caminar erguidos 347
Varias especies de *Australopithecus* surgieron en África 349
El género *Homo* se derivó del australopitecino hace 2.5 millones de años 349
La evolución del *Homo* estuvo acompañada por adelantos en la tecnología de las herramientas 349
Los hombres de Neanderthal tenían cerebros grandes y excelentes herramientas 350
Los seres humanos modernos surgieron hace menos de 200,000 años 350
Varias oleadas de homínidos emigraron de África 351
El origen evolutivo de los cerebros grandes quizás esté relacionado con el consumo de carne 351
El origen evolutivo de la conducta humana es altamente especulativo 353
La evolución cultural de los seres humanos es ahora mucho más rápida que la evolución biológica 353
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Gente pequeña, historia grande 353

18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356

ESTUDIO DE CASO El origen de un asesino 357
18.1 ¿Cómo se nombran y clasifican los organismos? 358
Cada especie tiene un nombre único constituido por dos elementos 358
La clasificación se originó como una jerarquía de categorías 358
Los sistemáticos identifican las características que revelan las relaciones evolutivas 358
La anatomía desempeña un papel clave en la sistemática 359
Las semejanzas moleculares también son útiles para reconstruir la filogenia 360
18.2 ¿Cuáles son los dominios de la vida? 360
El sistema de cinco reinos mejoró los esquemas de clasificación 360
El sistema de tres dominios refleja con más precisión la historia de la vida 360
La clasificación en términos de reinos aún no está totalmente establecida 361
DE CERCA Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
18.3 ¿Por qué cambian las clasificaciones? 364
La designación de las especies cambia cuando se descubre nueva información 364
La definición de especie biológica en ocasiones es difícil o imposible de aplicar 364
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

18.4 ¿Cuántas especies existen? 366
ENLACES CON LA VIDA Un mundo pequeño 367
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DEL CASO:
El origen de un asesino 367

19 La diversidad de los procariotas y los virus 370

ESTUDIO DE CASO: Agentes de muerte 371

19.1 ¿Cuáles son los organismos que constituyen los dominios procarióticos Bacteria y Archaea? 372
Las bacterias y las arqueas son fundamentalmente diferentes 372
Los procariotas dentro de cada dominio son difíciles de clasificar 372
Los procariotas difieren en tamaño y forma 373

19.2 ¿Cómo sobreviven y se reproducen los procariotas? 373
Algunos procariotas son móviles 373
Muchas bacterias forman películas en las superficies 373
Las endosporas protectoras permiten a algunas bacterias soportar condiciones adversas 374
Los procariotas se especializan en hábitat específicos 374
Los procariotas presentan diversos tipos de metabolismo 375
Los procariotas se reproducen por fisión binaria 375
Los procariotas pueden intercambiar material genético sin reproducirse 376

19.3 ¿Cómo afectan los procariotas a los humanos y a otros eucariotas? 376
Los procariotas desempeñan papeles importantes en la nutrición animal 376
Los procariotas captan el nitrógeno que necesitan las plantas 376
Los procariotas son los recicladores de la naturaleza 376
Los procariotas pueden reducir la contaminación 377
Algunas bacterias constituyen una amenaza para la salud de los seres humanos 377
ENLACES CON LA VIDA Comensales indeseables 378

19.4 ¿Qué son los virus, los viroides y los priones? 379
Un virus consiste en una molécula de DNA o RNA envuelta en una cubierta proteica 380
Los virus son parásitos 380
Algunos agentes infecciosos son aún más simples que los virus 381
DE CERCA ¿Cómo se replican los virus? 382
Nadie sabe con certeza cómo se originaron estas partículas infecciosas 383
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Agentes de muerte 384

20 La diversidad de los protistas 386

ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 387

20.1 ¿Qué son los protistas? 388
La mayoría de los protistas son unicelulares 389
Los protistas presentan diversas formas de nutrición 389
Los protistas emplean diversas formas de reproducción 389
Los protistas provocan efectos importantes en los humanos 390

20.2 ¿Cuáles son los principales grupos de protistas? 390
Los excavados carecen de mitocondrias 390
Los euglenozoos tienen mitocondrias características 391
Los stramenopiles incluyen organismos fotosintéticos y no fotosintéticos 392
Los alveolados incluyen parásitos, depredadores y fitoplancton 393
Los cercozoos tienen seudópodos delgados y conchas complejas 395
Los amebozoos habitan en ambientes acuáticos y terrestres 397
Las algas rojas habitan principalmente en los océanos tropicales de aguas transparentes 398
La mayoría de las algas verdes habitan en estanques y lagos 399
CONEXIONES EVOLUTIVAS
Nuestros ancestros unicelulares 400
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 400

21 La diversidad de las plantas 402

ESTUDIO DE CASO La reina de los parásitos 403

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas? 404
En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides 404
Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes 404
Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental 404
Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos 405

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas? 405
Las algas verdes dieron origen a las plantas terrestres 405
Los ancestros de las plantas vivieron en aguas dulces 405

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la tierra? 406
El cuerpo de las plantas resiste la gravedad y la sequía 406
Los embriones de las plantas están protegidos y sus células sexuales se dispersan en ausencia de agua 406

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas? 407
Las briofitas carecen de estructuras de conducción 407
Las plantas vasculares tienen vasos conductores que también brindan sostén 410
Las plantas vasculares sin semilla incluyen los licopodios, las colas de caballo y los helechos 410
Las plantas con semilla dominan la Tierra con la ayuda de dos adaptaciones importantes: el polen y las semillas 410
Las gimnospermas son plantas con semilla que carecen de flores 410
Las angiospermas son plantas con semilla que dan flores 416
Las plantas que evolucionaron más recientemente tienen gametofitos más pequeños 416
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

22 La diversidad de los hongos 422

ESTUDIO DE CASO: Hongos descomunales 423

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos? 424
- El cuerpo de los hongos se compone de filamentos 424
- Los hongos obtienen sus nutrimentos de otros organismos 424
- Los hongos se propagan a través de esporas 424
- La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente 425

22.2 ¿Cuáles son los principales tipos de hongos? 425
- Los quitridiomicetos producen esporas natatorias 425
- Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides 426
- Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco 429
- Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava 429

22.3 ¿De qué manera interactúan los hongos con otras especies? 430
- Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas 430
- Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas 432
- Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas 432
- Algunos hongos son recicladores importantes 432

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos? 433
- Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas 433
- Los hongos producen enfermedades humanas 434
- Los hongos pueden producir toxinas 434
- Muchos antibióticos se derivan de los hongos 434
- GUARDIÁN DE LA TIERRA El caso de las setas que desaparecen 435
- Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía 435
- CONEXIONES EVOLUTIVAS El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
- ENLACES CON LA VIDA Recolecta con cuidado 436

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Hongos descomunales 437

23 Diversidad animal I: Invertebrados 440

ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 441

23.1 ¿Cuáles son las principales características de los animales? 442

23.2 ¿Qué características anatómicas marcan los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo de los animales? 442

23.3 ¿Cuáles son los principales fila de animales? 445
- Las esponjas tienen un cuerpo simple 445
- Los cnidarios son depredadores bien armados 447
- Los gusanos planos tienen órganos pero carecen de sistemas respiratorio y circulatorio 450
- Los anélidos están formados por segmentos idénticos 451
- La mayoría de los moluscos tienen conchas 453
- ENLACES CON LA VIDA Ayudantes de cirujanos 454
- Los artrópodos son los animales que dominan la Tierra 456
- Los gusanos redondos abundan y en su mayoría son diminutos 462
- Los equinodermos tienen un esqueleto de carbonato de calcio 463
- Los cordados incluyen a los vertebrados 464

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 464

24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

ESTUDIO DE CASO: Historia de peces 468

24.1 ¿Cuáles son las características distintivas de los cordados? 470
- Todos los cordados comparten cuatro estructuras distintivas 470
- Los cordados invertebrados habitan en los mares 471
- Los vertebrados tienen espina dorsal 471

24.2 ¿Cuáles son los principales grupos de vertebrados? 472
- Algunos vertebrados carecen de mandíbulas 472
- Los peces con mandíbulas dominan las aguas de la Tierra 473
- Los anfibios tienen una doble vida 475
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Ranas en peligro 476
- Los reptiles y las aves se han adaptado a la vida terrestre 477
- Los mamíferos producen leche para sus crías 480
- CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
- ENLACES CON LA VIDA ¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Historia de peces 484

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488

ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 489

25.1 ¿En qué difieren los comportamientos innatos y los aprendidos? 490
- Los comportamientos innatos no requieren experiencia previa 490
- Los comportamientos aprendidos se modifican con la experiencia 490

No hay una distinción importante entre comportamientos innatos y aprendidos 492

25.2 ¿Cómo se comunican los animales? 495
La comunicación visual es la más eficaz a distancias cortas 495
La comunicación por sonido es eficaz a distancias más largas 496
Los mensajes químicos persisten más tiempo y es difícil variarlos 496
La comunicación por tacto ayuda a establecer vínculos sociales 497

25.3 ¿Cómo compiten los animales por recursos? 497
Un comportamiento agresivo ayuda a obtener y conservar recursos 497
Las jerarquías de dominancia ayudan a controlar las interacciones agresivas 498
Los animales podrían defender territorios que contienen recursos 499

25.4 ¿Cómo encuentran pareja los animales? 501
Las señales vocales y visuales codifican el sexo, la especie y la calidad individual 501

25.5 ¿Qué tipos de sociedades forman los animales? 502
La vida en grupo tiene ventajas y desventajas 502
El comportamiento social varía entre especies 502
La formación de grupos con parientes fomenta el desarrollo del altruismo 503
Las abejas viven juntas en sociedades de estructura rígida 504
Las ratas topo desnudas forman una sociedad compleja de vertebrados 505

25.6 ¿La biología logra explicar el comportamiento humano? 506
El comportamiento de los recién nacidos tiene un componente innato importante 506
Los humanos adquieren el lenguaje fácilmente desde pequeños 506
Los comportamientos comunes a culturas diversas podrían ser innatos 507
Las personas podrían responder a feromonas 507
Estudios con gemelos revelan los componentes genéticos del comportamiento 508
La investigación biológica del comportamiento humano genera controversia 508
CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Por qué juegan los animales? 508

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 509

26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512

ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 513

26.1 ¿Cómo cambian de tamaño las poblaciones? 514
El potencial biótico puede generar un crecimiento exponencial 514

26.2 ¿Cómo se regula el crecimiento de las poblaciones? 515
El crecimiento exponencial ocurre sólo en condiciones especiales 515
La resistencia ambiental limita el crecimiento de las poblaciones 518
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores 519

26.3 ¿Cómo se distribuyen las poblaciones en el espacio y en el tiempo? 524

26.4 ¿Cómo está cambiando la población humana? 526
Los demógrafos estudian los cambios en la población humana 526
La población humana continúa creciendo rápidamente 526
Los adelantos tecnológicos han incrementado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra 526
GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
El crecimiento demográfico se distribuye de manera desigual 528
La estructura de edades actual de una población predice su crecimiento futuro 529
En Europa la fertilidad está por debajo del nivel de reposición 530
La población de Estados Unidos crece rápidamente 532
ENLACES CON LA VIDA Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 532

27 Interacciones de la comunidad 536

ESTUDIO DE CASO Invasión del mejillón cebra 537

27.1 ¿Por qué son importantes las interacciones de la comunidad? 538

27.2 ¿Cuál es la relación entre el nicho ecológico y la competencia? 538
El nicho ecológico define el lugar y el papel de cada especie en su ecosistema 538
La competencia ocurre siempre que dos organismos intentan utilizar los mismos recursos limitados 538
Las adaptaciones reducen la superposición de nichos ecológicos entre especies que coexisten 539
La competencia interespecífica contribuye a regular el tamaño de la población y la distribución de cada especie 540
La competencia dentro de una especie es un factor primordial en el control del tamaño de la población 540

27.3 ¿Cuáles son los resultados de las interacciones entre los depredadores y sus presas? 540
GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las interacciones entre depredador y presa moldean las adaptaciones evolutivas 543

27.4 ¿Qué es la simbiosis? 547

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Hormigas y acacias: una asociación ventajosa 549

27.5 ¿Cómo influyen las especies clave en la estructura de la comunidad? 549

27.6 Sucesión: ¿Cómo cambia una comunidad a través del tiempo? 550

Existen dos formas principales de sucesión: Primaria y secundaria 550

También hay sucesión en los estanques y lagos 553

La sucesión culmina en la comunidad clímax 553

Algunos ecosistemas se mantienen en un estado de subclímax 553

CONEXIONES EVOLUTIVAS: ¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La invasión del mejillón cebra 555

28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558

ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 559

28.1 ¿Cuáles son las trayectorias de la energía y de los nutrimentos? 560

28.2 ¿Cómo fluye la energía a través de las comunidades? 561

La energía entra en las comunidades por la vía de la fotosíntesis 561

La energía pasa de un nivel trófico a otro 562

La transferencia de energía de un nivel trófico a otro es ineficiente 564

GUARDIÁN DE LA TIERRA Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566

28.3 ¿Cómo se desplazan los nutrimentos dentro de los ecosistemas y entre ellos? 567

El ciclo del carbono pasa por la atmósfera, los océanos y las comunidades 567

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera 568

El ciclo del fósforo carece de componentes atmosféricos 569

La mayor parte del agua no sufre cambios químicos durante su ciclo 570

28.4 ¿A qué se debe la lluvia ácida? 571

La sobrecarga de los ciclos del nitrógeno y del azufre es la causa de la lluvia ácida 571

La sedimentación ácida daña la vida en lagos y bosques 572

La Ley del Aire Limpio ha reducido significativamente las emisiones de azufre, pero no las de nitrógeno 572

28.5 ¿Qué provoca el calentamiento global? 572

La interferencia en el ciclo del carbono contribuye al calentamiento global 572

Los gases de invernadero retienen el calor en la atmósfera 573

El calentamiento global tendrá graves consecuencias 574

¿Cómo está respondiendo la humanidad a esta amenaza? 575

GUARDIANES DE LA TIERRA Los polos en peligro 576

ENLACES CON LA VIDA Es posible hacer una diferencia 577

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 577

29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580

ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 581

29.1 ¿Qué factores influyen en el clima de la Tierra? 582

El Sol es el motor del clima y del estado del tiempo 582

Muchos factores físicos también influyen en el clima 582

29.2 ¿Qué condiciones son necesarias para la vida? 585

GUARDIÁN DE LA TIERRA El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586

29.3 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio terrestre? 585

Los biomas terrestres sostienen comunidades vegetales características 587

ENLACES CON LA VIDA ¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591

La precipitación pluvial y la temperatura determinan la vegetación que un bioma es capaz de sostener 598

29.4 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio acuático? 598

Los ecosistemas de agua dulce incluyen lagos, corrientes y ríos 598

Los ecosistemas marinos cubren gran parte de la Tierra 601

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 607

30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

ESTUDIO DE CASO De regreso de la extinción 611

30.1 ¿Qué es la biodiversidad y por qué debemos cuidarla? 612

Servicios de los ecosistemas: Usos prácticos para la biodiversidad 612

La economía ecológica reconoce el valor monetario de los servicios de los ecosistemas 614

30.2 ¿Está disminuyendo la biodiversidad de la Tierra? 615

La extinción es un proceso natural, pero las tasas se han elevado de forma alarmante 615

GUARDIÁN DE LA TIERRA Restauración de los Everglades 616

Cada vez es mayor el número de especies amenazadas por la extinción 616

30.3 ¿Cuáles son las principales amenazas contra la biodiversidad? 617

La humanidad está acabando con el "capital ecológico" de la Tierra 617

GUARDIÁN DE LA TIERRA

GUARDIÁN DE LA TIERRA En defensa de las tortugas marinas 621

30.4 ¿Cómo puede ayudar la biología de la conservación a preservar la biodiversidad? 623

Fundamentos de la biología de la conservación 623

La biología de la conservación es una ciencia integrada 623

Preservación de los ecosistemas salvajes 623

GUARDIÁN DE LA TIERRA Recuperación de un depredador clave 624

30.5 ¿Por qué la sustentabilidad es la clave de la conservación? 625

La vida y el desarrollo sustentables estimulan el bienestar ecológico y de la humanidad a largo plazo 625

Las reservas de la biosfera ofrecen modelos para la conservación y el desarrollo sustentable 626

La agricultura sustentable ayuda a preservar las comunidades naturales 627

El futuro está en tus manos 627

GUARDIÁN DE LA TIERRA Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629

ENLACES CON LA VIDA ¿Qué pueden hacer los individuos? 630

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO De regreso a la extinción 629

UNIDAD 5

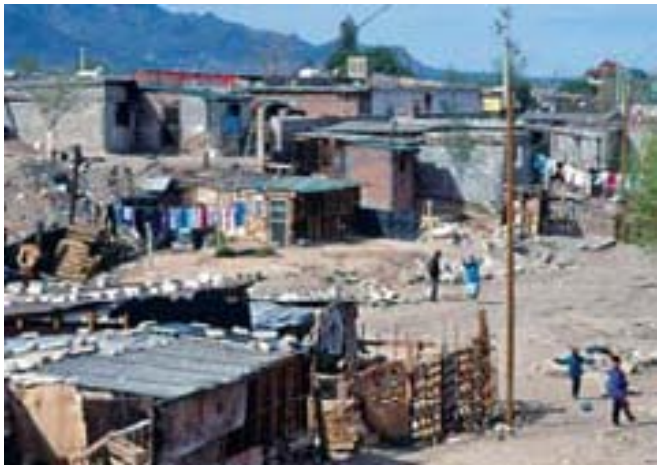
Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634

ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 635

31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno? 636

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica 636



Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal 636

ENLACES CON LA VIDA ¿Calor o humedad? 637

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas 638

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada 639

31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal? 639

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica 639

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan 643

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan 644

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 646

32 Circulación 648

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita 649

32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios? 650

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios 650

El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones 651

32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados? 651

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes 651

El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales 652

GUARDIÁN DE LA SALUD Al rescate de los corazones enfermos 654

32.3 ¿Qué es la sangre? 657

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos 658

Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos 658

Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades 659

Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre 659

32.4 ¿Qué tipo de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen? 661

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón 661

Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo 661

Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón 662

Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo 662

32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio? 663

Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio 664

El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre 664

El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre 665

El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades 665

33 Respiración 668

ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 669

33.1 ¿Por qué es necesario El intercambio de gases? 670

33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases? 670

Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas 671

Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión 671

Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos 672

Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas 672

DE CERCA Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente 674

33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano? 675

La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones 675

El intercambio de gases se efectúa en los alveolos 676

El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos 677

GUARDIÁN DE LA SALUD Fumar: una decisión de vida 678

ENLACES CON LA VIDA Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680

El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente 680

El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria 680

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 681

34 Nutrición y digestion 684

ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar hasta morir? 685

34.1 ¿Qué nutrimentos necesitan los animales? 686

La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías 686

Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol 686

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida 688

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas 688

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo 688

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo 688

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua 691

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada 691

34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión? 692

Generalidades de la digestión 692

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales 693

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple 693

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia 693

Especializaciones digestivas 693

34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos? 695

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca 695

El esófago conduce los alimentos al estómago 697

Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado 698

GUARDIÁN DE LA SALUD Las úlceras digieren el tracto digestivo 699

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado 700

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces 701

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas 701

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar o morir? 702

35 El sistema urinario 706

ESTUDIO DE CASO Compatibilidad perfecta 707

35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios? 708

35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados? 708

Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos 708

Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos 709

Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico 709

35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados? 709

Los riñones de los vertebrados filtran la sangre 709

La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente 709

35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano? 710

El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra 710

La orina se forma en las nefronas de los riñones 710

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas 712

DE CERCA Las nefronas y la formación de orina 712

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando los riñones fallan 714

El asa de Henle permite la concentración de la orina 714

35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis? 715

Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre 715

Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre 716

Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos 716

ENLACES CON LA VIDA ¿Demasiado líquido para beber? 717

36 Defensas contra la enfermedad 720

ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 721

36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad? 722
- Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa 722
- Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa 722

36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas? 723
- La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión 723
- Defensas internas no específicas combaten a los microbios 723

36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria? 725
- Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor 726
- Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque 729
- Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores 730

36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria? 730
- Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria 730
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las vacunas 732
- Los antibióticos frenan la reproducción microbiana 732

36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente? 733
- Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas 733
- GUARDIÁN DE LA SALUD El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
- Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo 734
- Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario 735
- El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria 736

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 738

37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740

ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 741

37.1 ¿Cómo se comunican las células animales? 742

37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales? 742
- Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes 742
- El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino 742
- Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco 743
- Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas 744
- Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes 746

37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos? 746
- Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio 750
- El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina 752
- Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides 752
- Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas 753
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Engaño endocrino 754
- Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas 755
- ENLACES CON LA VIDA Más cerca de la cura de la diabetes 756
- CONEXIONES EVOLUTIVAS La evolución de las hormonas 756

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 757

38 El sistema nervioso y los sentidos 760

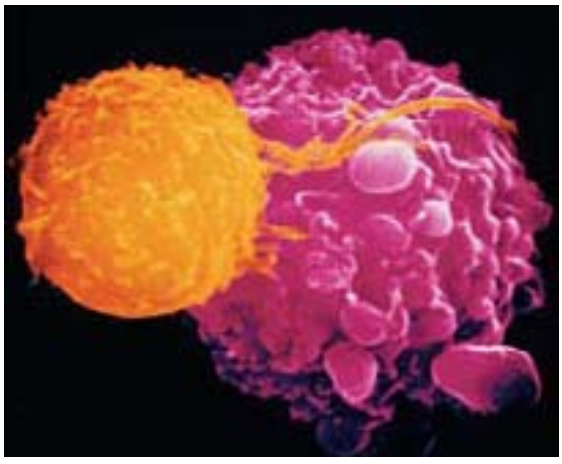
ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 761

38.1 ¿Qué estructura y funciones tienen las neuronas? 762

38.2 ¿Cómo se genera y se transmite la actividad neuronal? 762
- Las neuronas generan voltajes eléctricos a través de sus membranas 762
- Las neuronas se comunican por las sinapsis 763

38.3 ¿Cómo se organizan los sistemas nerviosos? 764
- El procesamiento de la información en el sistema nervioso requiere de cuatro operaciones básicas 764
- DE CERCA Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
- GUARDIÁN DE LA SALUD Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
- Los caminos neuronales dirigen el comportamiento 770
- Los sistemas nerviosos complejos están centralizados 770

38.4 ¿Cómo se organiza el sistema nervioso humano? 770
- El sistema nervioso periférico vincula al sistema nervioso central con el cuerpo 771
- El sistema nervioso central consiste en la médula espinal y el encéfalo 773
- La médula espinal es un cable de axones protegido por la espina dorsal 773
- El encéfalo consta de varias partes especializadas para desempeñar funciones específicas 774



38.5 ¿Cómo produce el encéfalo la mente? 778
El hemisferio izquierdo y el hemisferio derecho del cerebro se especializan en diferentes funciones 778
Dilucidar los mecanismos del aprendizaje y la memoria es el objetivo de profundas investigaciones 778
El conocimiento de cómo el cerebro crea la mente proviene de diversas fuentes 779
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780

38.6 ¿Cómo funcionan los receptores sensoriales? 781

38.7 ¿Cómo se detectan los estímulos mecánicos? 782

38.8 ¿Cómo se detecta el sonido? 782
El oído convierte las ondas sonoras en señales eléctricas 782

38.9 ¿Cómo se detecta la luz? 785
Los ojos compuestos de los artrópodos producen una imagen de mosaico 785
El ojo de los mamíferos capta y enfoca las ondas luminosas y las convierte en señales eléctricas 785

38.10 ¿Cómo se detectan las sustancias químicas? 788
Los receptores olfatorios detectan las sustancias químicas en el aire 788
Los receptores del gusto detectan las sustancias que entran en contacto con la lengua 789
El dolor es un sentido químico especializado 790
CONEXIONES EVOLUTIVAS Sentidos poco comunes 790
Ecolocalización 790
Detección de campos eléctricos 790
Detección de campos magnéticos 791

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 792

39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796

ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 797

39.1 Una introducción a los sistemas muscular y esquelético 798

39.2 ¿Cómo trabajan los músculos? 798
La estructura y la función de las células de los músculos esqueléticos están íntimamente relacionadas 800
Las contracciones musculares son el resultado del deslizamiento de los filamentos gruesos y delgados 800
El músculo cardiaco acciona al corazón 804
El músculo liso produce contracciones lentas e involuntarias 804

39.3 ¿Qué función desempeña el esqueleto? 804
Entre los animales hay tres tipos de esqueletos 804
El esqueleto de los vertebrados desempeña muchas funciones 805

39.4 ¿Qué tejidos forman el esqueleto de los vertebrados? 806
El cartílago proporciona un sostén flexible y conexiones 806
El hueso brinda al cuerpo un armazón rígido y resistente 806
La remodelación ósea permite la reparación del esqueleto y su adaptación a las tensiones 807
GUARDIÁN DE LA SALUD Cómo se repara un hueso fracturado 808

39.5 ¿Cómo se mueve el cuerpo? 808
Los músculos mueven al esqueleto en torno a articulaciones flexibles 808
GUARDIÁN DE LA SALUD Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 810
ENLACES CON LA VIDA Caminar con un perro 811

40 Reproducción animal 814

ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 815

40.1 ¿Cómo se reproducen los animales? 816
La reproducción asexual no implica la fusión de espermatozoide y óvulo 816
La reproducción sexual requiere de la unión de un espermatozoide y un óvulo 817

40.2 ¿Cómo funciona el aparato reproductor humano? 820
La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad 820
El tracto reproductor masculino incluye los testículos y las estructuras accesorias 820
El tracto reproductor femenino comprende los ovarios y las estructuras accesorias 823
La cópula permite la fecundación interna 825
DE CERCA El control hormonal del ciclo menstrual 826
GUARDIÁN DE LA SALUD Enfermedades de transmisión sexual 828

40.3 ¿Cómo podemos limitar la fertilidad? 829
La esterilización es un método anticonceptivo permanente 829
La anticoncepción y el aborto evitan o ponen fin al embarazo 829
GUARDIÁN DE LA SALUD Reproducción con alta tecnología 831
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de un anticonceptivo masculino 832

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 832

41 Desarrollo animal 836

ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 837

41.1 ¿En qué difieren el desarrollo indirecto y el directo? 838
Durante el desarrollo indirecto, los animales sufren un cambio radical en la forma de su cuerpo 838

Los animales recién nacidos que tienen un desarrollo directo parecen adultos en miniatura 839

41.2 ¿Cómo procede el desarrollo animal? 840
Con la segmentación del cigoto se inicia el desarrollo 841
La gastrulación forma tres capas de tejidos 841
Las estructuras adultas se desarrollan durante la organogénesis 841

41.3 ¿Cómo se controla el desarrollo? 842
Cada célula contiene todos los planos genéticos del organismo 842
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La promesa de las células madre 843
La transcripción genética se regula con precisión durante el desarrollo 844

41.4 ¿Cómo se desarrollan los seres humanos? 845
Durante los primeros dos meses, la diferenciación y el crecimiento son muy rápidos 845
La placenta secreta hormonas y permite el intercambio de materiales entre la madre y el embrión 848
El crecimiento y el desarrollo continúan durante los últimos siete meses 850
El desarrollo culmina con el parto y el alumbramiento 850
Las hormonas del embarazo estimulan la secreción de leche 851
GUARDIÁN DE LA SALUD La placenta sólo brinda una protección parcial 852
El envejecimiento es inevitable 852
ENLACES CON LA VIDA ¿Por qué el parto es tan difícil? 854

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 854

UNIDAD 6

Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858

ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 859

42.1 ¿Cómo está organizado el cuerpo de las plantas y cómo crecen? 860
Las fanerógamas consisten en un sistema de raíces y un sistema de vástago 860
Durante el crecimiento de una planta, células meristemáticas producen células diferenciadas 861

42.2 ¿Qué tejidos y tipos de células tienen las plantas? 862
El sistema de tejido dérmico cubre el cuerpo de la planta 862
El sistema de tejido fundamental constituye casi todo el cuerpo de las plantas jóvenes 863
El sistema de tejido vascular transporta agua y nutrimentos 864

42.3 ¿Cuáles son las estructuras y funciones de las hojas, las raíces y los tallos? 865

42.4 ¿Cómo obtienen nutrimentos las plantas? 873
Las raíces obtienen minerales del suelo 873
Las relaciones simbióticas ayudan a las plantas a obtener nutrimentos 873
DE CERCA ¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

42.5 ¿Cómo transportan las plantas el agua de las raíces a las hojas? 876
El movimiento del agua en el xilema se explica con la teoría de cohesión-tensión 876
Estomas ajustables controlan la intensidad de la transpiración 877
GUARDIÁN DE LA TIERRA Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878

42.6 ¿Cómo transportan azúcares las plantas? 879
La teoría de flujo-presión explica el movimiento de azúcares en el floema 879
CONEXIONES EVOLUTIVAS Adaptaciones especiales de raíces, tallos y hojas 880
Algunas raíces especializadas almacenan alimento; otras realizan fotosíntesis 880
Algunos tallos especializados producen plantas nuevas, almacenan agua o alimento, o bien, producen espinas o zarcillos 880
Hojas especializadas conservan y almacenan agua y alimentos e incluso capturan insectos 881

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 883

43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886

ESTUDIO DE CASO ¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 887

43.1 ¿Cuáles son las características fundamentales de los ciclos de vida de las plantas? 888
Las plantas participan en el sexo 888
La alternancia de generaciones es evidente en los helechos y los musgos 889

43.2 ¿Cómo se adapta la reproducción en las plantas con semilla a los ambientes secos? 889

43.3 ¿Cuál es la función y la estructura de las flores? 889
La mayoría de las flores atraen a los animales que las polinizan 889
GUARDIÁN DE LA SALUD

Las flores completas tienen cuatro partes principales 892
El polen contiene el gametofito masculino 892
El gametofito femenino se forma dentro del óvulo del ovario 895
La polinización de la flor permite la fecundación 895

43.4 ¿Cómo se desarrollan los frutos y las semillas? 896
El fruto se desarrolla a partir del ovario 896
La semilla se desarrolla a partir del óvulo 896
GUARDIÁN DE LA TIERRA Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

43.5 ¿Cómo germinan y crecen las semillas? 899
El estado de latencia de las semillas ayuda a asegurar la germinación en el momento apropiado 899
En la germinación, la raíz surge primero, seguida del vástago 899
Los cotiledones nutren a la semilla germinada 899

43.6 ¿Cuáles son algunas adaptaciones para la polinización y la dispersión de semillas? 900
La coevolución pone en contacto a plantas y polinizadores 900
Los frutos ayudan a dispersar las semillas 903

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 904

44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 909

44.1 ¿Qué son las hormonas vegetales y cómo actúan? 910

44.2 ¿Cómo regulan las hormonas el ciclo de vida de las plantas? 911
El ciclo de vida de las plantas comienza con una semilla 911
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912
La auxina controla la orientación de la plántula que brota 913
La forma genéticamente determinada de la planta adulta es resultado de interacciones hormonales 915
La duración del día controla la floración 916
Las hormonas coordinan el desarrollo de semillas y frutos 918
La senectud y el estado de latencia preparan a la planta para el invierno 919

44.3 ¿Las plantas pueden comunicarse y moverse rápidamente? 920
Las plantas llaman a los "guardianes" cuando son atacadas 920
Las plantas podrían advertir a sus vecinos y a su descendencia de los ataques 920
Algunas plantas se mueven rápidamente 921

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 922

Apéndice I: Conversiones del sistema métrico 925

Apéndice II: Clasificación de los principales grupos de organismos 926

Apéndice III: Vocabulario de biología: raíces, prefijos y sufijos de uso común 927

Glosario G1

Respuestas a las preguntas de pies de figura A1

Créditos fotográficos P1

Índice I1

Prefacio

Nuestros alumnos reciben y continuarán recibiendo un cúmulo de información científica, y muchas veces de información errónea, sobre una diversidad de temas: calentamiento global, cultivos manipulados mediante bioingeniería, investigación sobre células madre, enfermedad de las vacas locas y biodiversidad, entre muchos otros. En un campo en rápida expansión como el de la biología, ¿cómo se decide qué conceptos y hechos comunicar? ¿Qué tipo de conocimiento sobre biología ayudará mejor a los estudiantes a tomar decisiones informadas en relación con sus vidas, en el presente y en el futuro? ¿Qué conocimientos ayudarán a los estudiantes a prepararse mejor para los cursos más avanzados? Hemos revisado la octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* reconociendo que no existen respuestas únicas a tales preguntas y con la idea de dar a los usuarios del libro mayores opciones.

Al consultar con educadores comprometidos en la emocionante pero desafiante misión de introducir a los alumnos en el campo de la biología, surgió un consenso: "Necesitamos ayudar a los estudiantes a estar informados en el terreno científico". El conocimiento científico da a un estudiante herramientas mentales para hacer frente al conocimiento en expansión. Esto requiere un fundamento de conocimiento fáctico que provea un marco cognoscitivo en el que pueda integrarse la nueva información. No obstante, el conocimiento científico también incluye la capacidad de captar y evaluar nuevos datos de los medios de información, como la prensa. Un individuo informado en el terreno científico reconoce la interrelación de los conceptos y la necesidad de integrar información proveniente de muchas áreas.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA COMUNICA DE MANERA EFICAZ LA RIQUEZA DE LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA

La octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* no sólo es un libro revisado y mejorado, sino un paquete completo de herramientas de aprendizaje para los estudiantes, y de enseñanza para los profesores. Nuestras principales metas son:

- Ayudar a los profesores a presentar la información sobre el tema en una forma que fomente el conocimiento científico entre los alumnos.
- Ayudar a los estudiantes a adquirir información de acuerdo con sus propios estilos de aprendizaje.
- Ayudar a los estudiantes a relacionar esta información con sus propias vidas, así como a comprender su importancia y relevancia.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA

…está organizado de manera clara y uniforme

En todos los capítulos, los alumnos encontrarán herramientas que les permitirán navegar a través de la información.

- Cada capítulo inicia con una sección "De un vistazo", en la que se presentan los principales apartados y ensayos de ese capítulo. Los profesores pueden asignar fácilmente —y los estudiantes podrán localizar— los temas clave dentro del capítulo.
- Las secciones principales se presentan con preguntas generales, mientras que los subtítulos son enunciados que resumen y reflejan su contenido más específico. Una importante meta pedagógica de esta organización es el énfasis en la biología como una jerarquía de conceptos interrelacionados, y no como un simple compendio de temas aislados e independientes.
- El "Resumen de conceptos clave" une importantes conceptos utilizando los títulos de mayor jerarquía en el capítulo, y su sistema de numeración permite a los profesores y estudiantes revisar la información de manera eficiente.
- Se incluyen preguntas al final de cada Estudio de caso, en muchos pies de figura, así como en la sección "Aplicación de conceptos". Estas características estimulan a los estudiantes a pensar acerca de la ciencia en vez de sólo memorizar los hechos.

…contiene ilustraciones mejoradas

A partir del consejo de los revisores y del cuidadoso escrutinio de los autores, una vez más hemos mejorado las ilustraciones. Para esta octava edición:

- ***Se agregaron y remplazaron muchas fotografías*** para ayudar a captar el interés del estudiante. La organización del libro, ahora más flexible, permitió incorporar fotografías de plantas y animales que antes sólo se describían en palabras.
- ***Continúa el énfasis en la consistencia del color*** Los colores se utilizan de manera consistente para ilustrar átomos, estructuras y procesos específicos.
- ***Se agregaron más figuras que ilustran procesos clave*** Además de volver a dibujar muchos diagramas para hacerlos más claros e interesantes, agregamos nuevas figuras que ilustran visualmente y concatenan procesos complejos, como el de la fotosíntesis y la respiración celular.
- ***Hay mayor claridad en los rótulos de las figuras*** Hemos agregado recuadros de texto dentro de las figuras para garantizar explicaciones más claras.
- ***Una vez más, en muchos pies de figura se incluyen preguntas que hacen reflexionar al estudiante*** Las respuestas a estas preguntas están disponibles por primera vez al final del libro.

…se actualizó y reorganizó

Incorporamos información acerca de descubrimientos científicos sobre los que los estudiantes quizás hayan leído en los periódicos; la información se ubica en el contexto científico para ayudar a consolidar su conocimiento. Aunque cada capítulo se revisó cuidadosamente, he aquí algunos puntos de interés de la octava edición:

- ***Unidad 1: La vida de la célula*** Nuevos casos introducen al estudiante en el terreno de la bioingeniería y le presentan los enigmáticos priones, responsables de la enfermedad de las vacas locas. En respuesta a las sugerencias de los revisores, hemos invertido el orden de presentación de los capí-

30, "Conservación de la biodiversidad de la Tierra", describe los servicios que prestan los ecosistemas y los intentos por calcular su valor para la humanidad. Se explica cómo las actividades humanas reducen la biodiversidad y se analiza cómo los esfuerzos de conservación y usos sustentables pueden preservar y restaurar los ecosistemas funcionales.

- ***Unidad 5: Anatomía y fisiología de los animales*** Esta unidad se inicia con una cobertura revisada de la homeostasis y la termorregulación. Los estudiantes encontrarán información nueva y actualizada sobre temas vigentes, que incluyen anorexia y obesidad, gripe aviar, la neuroquímica del amor, tecnología reproductiva, nuevos anticonceptivos, enfermedades de transmisión sexual, células madre y síndrome de alcoholismo fetal. Hemos conservado nuestro enfoque en el ser humano brindando información comparativa, nuevos temas como el intercambio de gases contracorriente en los peces, los túbulos de Malpighi en los insectos y nuevas secciones sobre las hormonas y las defensas contra las enfermedades de los invertebrados.

Unidad 2: Herencia

- ***Unidad 6: Anatomía y fisiología de las plantas*** Esta unidad hace alarde de muchas figuras revisadas y nuevas fotos para ilustrar mejor la anatomía y los procesos fisiológicos de las plantas, así como las fascinantes adaptaciones al ambiente. También se amplió la cobertura de los usos agrícolas de las hormonas vegetales.

…compromete y motiva a los estudiantes

Los estudiantes no pueden volverse letrados en ciencia por imposición; deben participar activamente en adquirir tanto la información como las destrezas necesarias para tal efecto. Por ello es crucial que los estudiantes reconozcan que la biología se refiere a sus vidas personales y a la vida a su alrededor. Para ayudar a los estudiantes a comprometerse y a sentirse motivados, esta nueva edición continúa ofreciendo las siguientes características:

Unidad 3: Evolución y diversidad de la vida

- ***Enlaces con la vida*** La breve sección "Enlaces con la vida", escrita de manera informal, se relaciona con temas que son familiares al estudiante, a la vez que relevantes para el capítulo.
- ***Estudios de caso*** En esta octava edición, hemos conservado y actualizado los estudios de caso más relevantes, al tiempo que se introdujeron otros nuevos. Los estudios de caso se basan en asuntos de actualidad, situaciones que atañen a los estudiantes o temas de biología particularmente fascinantes. Al final de cada capítulo, la sección "Otro vistazo al estudio de caso" permite a los estudiantes explorar el tema más a fondo a la luz de lo que aprendieron. Los estudiantes también encontrarán una investigación con mayor profundidad de cada estudio de caso en el sitio Web de este libro.

Unidad 4: Comportamiento y ecología

- ***Bioética*** Muchos temas explorados en el texto tienen implicaciones éticas para la vida humana. Entre ellos se incluyen la ingeniería genética y la clonación, el uso de animales en investigaciones y el efecto de las actividades humanas en otras especies. Ahora están identificados con un icono de bioética que alerta a los estudiantes y profesores sobre la posibilidad de discutir e investigar más ampliamente.
- ***Ensayos*** Conservamos el conjunto completo de ensayos en esta edición. Los recuadros "Guardián de la Tierra" exploran asuntos ambientales de actualidad, mientras que las secciones "Guardián de la salud" se ocupan de temas mé-

dicos. Los ensayos De cerca permiten a los profesores explorar temas selectos con mayor detalle; las secciones "Investigación científica" explican cómo se adquiere el conocimiento científico. Los ensayos bajo el título "Conexiones evolutivas" cierran algunos de los capítulos ubicando los temas en un contexto evolutivo.

…ofrece diferentes medios y complementos

- ***Instructor Resource Center*** Ningún otro libro de texto para este curso ofrece tantas opciones y tanta innovación y calidad en el apoyo al profesor. Los recursos incluyen todo el trabajo de arte del libro (con rótulos, sin rotular y susceptible de editarse), en formato JPEG y en varios archivos de PowerPoint ® que incluyen presentaciones del capítulo, así como cientos de animaciones en segunda y tercera dimensión y simulaciones para hacer presentaciones en PowerPoint ®.
- *Además incluye l*a colección más prestigiada de preguntas de examen en esta materia, revisada y actualizada.
- ***Companion Web site with Grade Tracker* (www.pearsoneducacion.net/audesirk)** Este sitio Web en inglés está disponible las 24 horas los 7 días de la semana y se enfoca en herramientas de estudio para ayudar a los estudiantes a dominar los conceptos del curso. El sitio incluye una guía de orientación *online* para organizar el estudio, cuestionarios de los capítulos para ayudar a los alumnos a determinar qué tan bien conocen la información y 103 tutoriales Web que presentan animaciones y actividades para ayudar a explicar los conceptos más desafiantes en cada capítulo.

RECONOCIMIENTOS

Biología: La vida en la Tierra es en verdad un trabajo de equipo. Nuestra editora de desarrollo Anne Scanlan-Rohrer buscó maneras de hacer el texto más claro, consistente y amigable para los alumnos. El director de arte John Christiana desarrolló y realizó un diseño fresco para esta nueva edición, y la editora de arte Rhonda Aversa coordinó hábilmente el trabajo con las ilustraciones. Las nuevas y mejoradas ilustraciones fueron diseñadas por Artworks con la ayuda de Jay McElroy. La investigadora de fotografía Ivonne Gerin buscó incansablemente fotografías excelentes. Christianne Thillen realizó el trabajo de corrección con meticulosa atención a los detalles. Tim Flem, nuestro editor de producción, reunió el trabajo de arte, las fotografías y el texto en una obra perfectamente integrada y aceptó los cambios de último momento con admirable buen ánimo. El editor de medio Patrick Shriner y la asistente de edición Crissy Dudonis coordinaron la producción de todos los medios y materiales auxiliares de estudio que hicieron posible el paquete completo de *Biología: La vida en la Tierra*. El director de marketing, Mandy Jellerichs, ayudó a crear la estrategia de marketing que comunicara de la manera más eficaz posible nuestro mensaje a la audiencia. Los editores Teresa Chung y Jeff Howard dirigieron el proyecto con energía e imaginación. Agradecemos a Teresa su fe inquebrantable en el proyecto y por reunir un fantástico equipo que lo pusiera en marcha. También agradecemos a Jeff por llevar este enorme proyecto a término con paciencia y destreza.

TERRY Y GERRY AUDESIRK
BRUCE E. BYERS

REVISORES DE LA OCTAVA EDICIÓN

George C. Argyros, *Northeastern University*
Peter S. Baletsa, *Northwestern University*
John Barone, *Columbus State University*
Michael C. Bell, *Richland College*
Melissa Blamires, *Salt Lake Community College*
Robert Boyd, *Auburn University*
Michael Boyle, *Seattle Central Community College*
Matthew R. Burnham, *Jones County Junior College*
Nicole A. Cintas, *Northern Virginia Community College*
Jay L. Comeaux, *Louisiana State University*
Sharon A. Coolican, *Cayuga Community College*
Mitchell B. Cruzan, *Portland State University*
Lewis Deaton, *University of Louisiana-Lafayette*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Teresa L. Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Martha Groom, *University of Washington*
Richard Hanke, *Rose State College*
Kelly Hogan, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Dale R. Horeth, *Tidewater Community College*
Joel Humphrey, *Cayuga Community College*
James Johnson, *Central Washington University*
Joe Keen, *Patrick Henry Community College*
Aaron Krochmal, *University of Houston-Downtown*
Stephen Lebsack, *Linn-Benton Community College*
David E. Lemke, *Texas State University*
Jason L. Locklin, *Temple College*
Cindy Malone, *California State University-Northridge*
Mark Manteuffel, *St. Louis Community College*
Steven Mezik, *Herkimer County Community College*
Christine Minor, *Clemson University*
Lee Mitchell, *Mt. Hood Community College*
Nicole Moore, *Austin Peay University*
James Mulrooney, *Central Connecticut State University*
Charlotte Pedersen, *Southern Utah University*
Robert Kyle Pope, *Indiana University South Bend*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Jennifer J. Quinlan, *Drexel University*
Robert N. Reed, *Southern Utah University*
Wenda Ribeiro, *Thomas Nelson Community College*
Elizabeth Rich, *Drexel University*
Frank Romano, *Jacksonville State University*
Amanda Rosenzweig, *Delgado Community College*
Marla Ruth, *Jones County Junior College*
Eduardo Salazar, *Temple College*

Brian W. Schwartz, *Columbus State University*
Steven Skarda, *Linn-Benton Community College*
Mark Smith, *Chaffey College*
Dale Smoak, *Piedmont Technical College*
Jay Snaric, *St. Louis Community College*
Phillip J. Snider, *University of Houston*
Gary Sojka, *Bucknell University*
Nathaniel J. Stricker, *Ohio State University*
Martha Sugermeyer, *Tidewater Community College*
Peter Svensson, *West Valley College*
Sylvia Torti, *University of Utah*
Rani Vajravelu, *University of Central Florida*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Diana Wheat, *Linn-Benton Community College*
Lawrence R. Williams, *University of Houston*
Michelle Withers, *Louisiana State University*
Taek You, *Campbell University*
Martin Zahn, *Thomas Nelson Community College*
Izanne Zorin, *Northern Virginia Community College-Alexandria*

REALIZADORES Y REVISORES DE MEDIOS DE APOYO Y COMPLEMENTOS

Tamatha Barbeau, *Francis Marion University*
Linda Flora, *Montgomery County Community College*
Anne Galbraith, *University of Wisconsin-La Crosse*
Christopher Gregg, *Louisiana State University*
Theresa Hornstein, *Lake Superior College*
Dawn Janich, *Community College of Philadelphia*
Steve Kilpatrick, *University of Pittsburgh at Johnstown*
Bonnie L. King, *Quinnipiac University*
Michael Kotarski, *Niagara University*
Nancy Pencoe, *University of West Georgia*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Greg Pryor, *Francis Marion University*
Mark Sugalski, *Southern Polytechnic State University*
Eric Stavney, *DeVry University*
Michelle D. Withers, *Louisiana State University*
Michelle Zurawski, *Moraine Valley Community College*

REVISORES DE EDICIONES PREVIAS

W. Sylvester Allred, *Northern Arizona University*
Judith Keller Amand, *Delaware County Community College*
William Anderson, *Abraham Baldwin Agriculture College*
Steve Arch, *Reed College*
Kerri Lynn Armstrong, *Community College of Philadelphia*
G. D. Aumann, *University of Houston*
Vernon Avila, *San Diego State University*
J. Wesley Bahorik, *Kutztown University of Pennsylvania*
Bill Barstow, *University of Georgia-Athens*
Colleen Belk, *University of Minnesota, Duluth*
Michael C. Bell, *Richland College*
Gerald Bergtrom, *University of Wisconsin*
Arlene Billock, *University of Southwestern Louisiana*
Brenda C. Blackwelder, *Central Piedmont Community College*
Raymond Bower, *University of Arkansas*
Marilyn Brady, *Centennial College of Applied Arts and Technology*
Virginia Buckner, *Johnson County Community College*
Arthur L. Buikema, Jr., *Virginia Polytechnic Institute*
J. Gregory Burg, *University of Kansas*
William F. Burke, *University of Hawaii*
Robert Burkholter, *Louisiana State University*
Kathleen Burt-Utley, *University of New Orleans*
Linda Butler, *University of Texas-Austin*
W. Barkley Butler, *Indiana University of Pennsylvania*
Jerry Button, *Portland Community College*
Bruce E. Byers, *University of Massachusetts-Amherst*
Sara Chambers, *Long Island University*
Nora L. Chee, *Chaminade University*
Joseph P. Chinnici, *Virginia Commonwealth University*
Dan Chiras, *University of Colorado-Denver*
Bob Coburn, *Middlesex Community College*
Joseph Coelho, *Culver Stockton College*
Martin Cohen, *University of Hartford*
Walter J. Conley, *State University of New York at Potsdam*
Mary U. Connell, *Appalachian State University*
Jerry Cook, *Sam Houston State University*
Joyce Corban, *Wright State University*
Ethel Cornforth, *San Jacinto College-South*
David J. Cotter, *Georgia College*
Lee Couch, *Albuquerque Technical Vocational Institute*
Donald C. Cox, *Miami University of Ohio*
Patricia B. Cox, *University of Tennessee*
Peter Crowcroft, *University of Texas--Austin*
Carol Crowder, *North Harris Montgomery College*
Donald E. Culwell, *University of Central Arkansas*
Robert A. Cunningham, *Erie Community College, North*
Karen Dalton, *Community College of Baltimore County-Catonsville Campus*
Lydia Daniels, *University of Pittsburgh*
David H. Davis, *Asheville-Buncombe Technical Community College*
Jerry Davis, *University of Wisconsin-La Crosse*
Douglas M. Deardon, *University of Minnesota*
Lewis Deaton, *University of Southwestern Louisiana*
Fred Delcomyn, *University of Illinois-Urbana*
David M. Demers, *University of Hartford*
Lorren Denney, *Southwest Missouri State University*
Katherine J. Denniston, *Towson State University*
Charles F. Denny, *University of South Carolina-Sumter*
Jean DeSaix, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Ed DeWalt, *Louisiana State University*
Daniel F. Doak, *University of California-Santa Cruz*
Matthew M. Douglas, *University of Kansas*
Ronald J. Downey, *Ohio University*
Ernest Dubrul, *University of Toledo*
Michael Dufresne, *University of Windsor*

Susan A. Dunford, *University of Cincinnati*
Mary Durant, *North Harris College*
Ronald Edwards, *University of Florida*
Rosemarie Elizondo, *Reedley College*
George Ellmore, *Tufts University*
Joanne T. Ellzey, *University of Texas-El Paso*
Wayne Elmore, *Marshall University*
Thomas Emmel, *University of Florida*
Carl Estrella, *Merced College*
Nancy Eyster-Smith, *Bentley College*
Gerald Farr, *Southwest Texas State University*
Rita Farrar, *Louisiana State University*
Marianne Feaver, *North Carolina State University*
Susannah Feldman, *Towson University*
Linnea Fletcher, *Austin Community College-Northridge*
Charles V. Foltz, *Rhode Island College*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Douglas Fratianne, *Ohio State University*
Scott Freeman, *University of Washington*
Donald P. French, *Oklahoma State University*
Harvey Friedman, *University of Missouri-St. Louis*
Don Fritsch, *Virginia Commonwealth University*
Teresa Lane Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Michael Gaines, *University of Kansas*
Irja Galvan, *Western Oregon University*
Gail E. Gasparich, *Towson University*
Farooka Gauhari, *University of Nebraska-Omaha*
John Geiser, *Western Michigan University*
George W. Gilchrist, *University of Washington*
David Glenn-Lewin, *Iowa State University*
Elmer Gless, *Montana College of Mineral Sciences*
Charles W. Good, *Ohio State University-Lima*
Margaret Green, *Broward Community College*
David Grise, *Southwest Texas State University*
Lonnie J. Guralnick, *Western Oregon University*
Martin E. Hahn, *William Paterson College*
Madeline Hall, *Cleveland State University*
Georgia Ann Hammond, *Radford University*
Blanche C. Haning, *North Carolina State University*
Richard Hanke, *Rose State College*
Helen B. Hanten, *University of Minnesota*
John P. Harley, *Eastern Kentucky University*
William Hayes, *Delta State University*
Stephen Hedman, *University of Minnesota*
Jean Helgeson, *Collins County Community College*
Alexander Henderson, *Millersville University*
Timothy L. Henry, *University of Texas-Arlington*
James Hewlett, *Finger Lakes Community College*
Alison G. Hoffman, *University of Tennessee-Chattanooga*
Leland N. Holland, *Paso-Hernando Community College*
Laura Mays Hoopes, *Occidental College*
Michael D. Hudgins, *Alabama State University*
David Huffman, *Southwest Texas State University*
Donald A. Ingold, *East Texas State University*
Jon W. Jacklet, *State University of New York-Albany*
Rebecca M. Jessen, *Bowling Green State University*
J. Kelly Johnson, *University of Kansas*
Florence Juillerat, *Indiana University-Purdue University at Indianapolis*
Thomas W. Jurik, *Iowa State University*
Arnold Karpoff, *University of Louisville*
L. Kavaljian, *California State University*
Jeff Kenton, *Iowa State University*
Hendrick J. Ketellapper, *University of California, Davis*
Jeffrey Kiggins, *Blue Ridge Community College*
Harry Kurtz, *Sam Houston State University*
Kate Lajtha, *Oregon State University*
Tom Langen, *Clarkson University*
Patricia Lee-Robinson, *Chaminade University of Honolulu*
William H. Leonard, *Clemson University*
Edward Levri, *Indiana University of Pennsylvania*
Graeme Lindbeck, *University of Central Florida*
Jerri K. Lindsey, *Tarrant County Junior College-Northeast*
John Logue, *University of South Carolina-Sumter*
William Lowen, *Suffolk Community College*
Ann S. Lumsden, *Florida State University*
Steele R. Lunt, *University of Nebraska-Omaha*
Daniel D. Magoulick, *The University of Central Arkansas*
Paul Mangum, *Midland College*
Richard Manning, *Southwest Texas State University*
Ken Marr, *Green River Community College*
Kathleen A. Marrs, *Indiana University-Purdue University Indianapolis*
Michael Martin, *University of Michigan*
Linda Martin-Morris, *University of Washington*
Kenneth A. Mason, *University of Kansas*
Margaret May, *Virginia Commonwealth University*
D. J. McWhinnie, *De Paul University*
Gary L. Meeker, *California State University, Sacramento*
Thoyd Melton, *North Carolina State University*
Joseph R. Mendelson III, *Utah State University*
Karen E. Messley, *Rockvalley College*
Timothy Metz, *Campbell University*
Glendon R. Miller, *Wichita State University*
Hugh Miller, *East Tennessee State University*
Neil Miller, *Memphis State University*
Jeanne Mitchell, *Truman State University*
Jack E. Mobley, *University of Central Arkansas*
John W. Moon, *Harding University*
Richard Mortenson, *Albion College*
Gisele Muller-Parker, *Western Washington University*
Kathleen Murray, *University of Maine*
Robert Neill, *University of Texas*
Harry Nickla, *Creighton University*
Daniel Nickrent, *Southern Illinois University*
Jane Noble-Harvey, *University of Delaware*
David J. O'Neill, *Community College of Baltimore County-Dundalk Campus*
James T. Oris, *Miami University of Ohio*
Marcy Osgood, *University of Michigan*
C. O. Patterson, *Texas A&M University*
Fred Peabody, *University of South Dakota*
Harry Peery, *Tompkins-Cortland Community College*
Rhoda E. Perozzi, *Virginia Commonwealth University*
Gary B. Peterson, *South Dakota State University*
Bill Pfitsch, *Hamilton College*
Ronald Pfohl, *Miami University of Ohio*
Bernard Possident, *Skidmore College*
Ina Pour-el, *DMACC-Boone Campus*
Elsa C. Price, *Wallace State Community College*
Marvin Price, *Cedar Valley College*
James A. Raines, *North Harris College*
Paul Ramp, *Pellissippi State Technical College*
Mark Richter, *University of Kansas*
Robert Robbins, *Michigan State University*

Jennifer Roberts, *Lewis University*
Chris Romero, *Front Range Community College*
Paul Rosenbloom, *Southwest Texas State University*
K. Ross, *University of Delaware*
Mary Lou Rottman, *University of Colorado-Denver*
Albert Ruesink, *Indiana University*
Connie Russell, *Angelo State University*
Christopher F. Sacchi, *Kutztown University*
Doug Schelhaas, *University of Mary*
Brian Schmaefsky, *Kingwood College*
Alan Schoenherr, *Fullerton College*
Edna Seaman, *University of Massachusetts, Boston*
Patricia Shields, *George Mason University*
Marilyn Shopper, *Johnson County Community College*
Anu Singh-Cundy, *Western Washington University*
Linda Simpson, *University of North Carolina-Charlotte*
Russel V. Skavaril, *Ohio State University*
John Smarelli, *Loyola University*
Shari Snitovsky, *Skyline College*
John Sollinger, *Southern Oregon University*
Sally Sommers Smith, *Boston University*
Jim Sorenson, *Radford University*
Mary Spratt, *University of Missouri, Kansas City*
Bruce Stallsmith, *University of Alabama-Huntsville*
Benjamin Stark, *Illinois Institute of Technology*
William Stark, *Saint Louis University*
Barbara Stebbins-Boaz, *Willamette University*
Kathleen M. Steinert, *Bellevue Community College*
Barbara Stotler, *Southern Illinois University*
Gerald Summers, *University of Missouri-Columbia*
Marshall Sundberg, *Louisiana State University*
Bill Surver, *Clemson University*
Eldon Sutton, *University of Texas-Austin*
Dan Tallman, *Northern State University*
David Thorndill, *Essex Community College*
William Thwaites, *San Diego State University*
Professor Tobiessen, *Union College*
Richard Tolman, *Brigham Young University*
Dennis Trelka, *Washington and Jefferson College*
Sharon Tucker, *University of Delaware*
Gail Turner, *Virginia Commonwealth University*
Glyn Turnipseed, *Arkansas Technical University*
Lloyd W. Turtinen, *University of Wisconsin-Eau Claire*
Robert Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Robin W. Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Kristin Uthus, *Virginia Commonwealth University*
F. Daniel Vogt, *State University of New York-Plattsburgh*
Nancy Wade, *Old Dominion University*
Susan M. Wadkowski, *Lakeland Community College*
Jyoti R. Wagle, *Houston Community College-Central*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Michael Weis, *University of Windsor*
DeLoris Wenzel, *University of Georgia*
Jerry Wermuth, *Purdue University-Calumet*
Jacob Wiebers, *Purdue University*
Carolyn Wilczynski, *Binghamton University*
P. Kelly Williams, *University of Dayton*
Roberta Williams, *University of Nevada-Las Vegas*
Emily Willingham, *University of Texas-Austin*
Sandra Winicur, *Indiana University-South Bend*
Bill Wischusen, *Louisiana State University*
Chris Wolfe, *North Virginia Community College*
Stacy Wolfe, *Art Institutes International*
Colleen Wong, *Wilbur Wright College*
Wade Worthen, *Furman University*
Robin Wright, *University of Washington*
Brenda L. Young, *Daemen College*
Cal Young, *Fullerton College*
Tim Young, *Mercer University*

Acerca de los autores

TERRY Y GERRY AUDESIRK crecieron en Nueva Jersey, donde se conocieron como estudiantes de licenciatura. Después de casarse en 1970, se mudaron a California, donde Terry obtuvo su doctorado en ecología marina en la Universidad del Sur de California y Gerry obtuvo su doctorado en neurobiología en el Instituto Tecnológico de California. Como estudiantes de posdoctorado en los laboratorios marinos de la Universidad de Washington, colaboraron en trabajos sobre las bases neurales del comportamiento, empleando un molusco marino como sistema modelo.

Terry y Gerry son profesores eméritos de biología en la Universidad de Colorado en Denver, donde impartieron las cátedras de introducción a la biología y neurobiología de 1982 a 2006. En su laboratorio de investigación, financiado por los Institutos Nacionales de la Salud, investigaron cómo los niveles bajos de contaminantes ambientales dañan las neuronas y cómo los estrógenos las protegen.

Terry y Gerry comparten un profundo aprecio por la naturaleza y el aire libre. Les gusta excursionar en las Rocallosas, correr cerca de su casa al pie de las montañas al oeste de Denver y tratar de mantener un huerto a 2130 metros de altitud en presencia de alces y venados hambrientos. Pertenecen desde hace tiempo a numerosas organizaciones dedicadas a la conservación del ambiente. Su hija, Heather, ha dado un nuevo enfoque a sus vidas.

BRUCE E. BYERS, originario de la región central norte de Estados Unidos, se trasladó a las colinas del oeste de Massachusetts, y se incorporó como profesor del departamento de biología de la Universidad de Massachusetts, Amherst. Desde 1993 ha sido miembro del cuerpo docente de la UMass, donde también obtuvo su doctorado. Bruce imparte cursos de introducción a la biología para estudiantes de carreras de ciencias biológicas y de otros campos; también de ornitología y comportamiento animal.

Su eterna fascinación por las aves lo llevó a explorar científicamente su biología. Sus investigaciones actuales se centran en la ecología del comportamiento de las aves, sobre todo en la función y evolución de las señales vocales que usan para comunicarse. La búsqueda de vocalizaciones a menudo obliga a Bruce a salir al campo, donde puede encontrársele antes del amanecer, con grabadora en mano, esperando los primeros trinos del nuevo día.

Para Heather, Jack y Lori y en memoria de Eve y Joe

T. A. & G. A.

A Bob y Ruth, con gratitud

B. E. B.

CAPÍTULO 24

Diversidad animal II: Vertebrados

¿Cómo te sentirías si supieras que los dinosaurios todavía viven en la Tierra? El descubrimiento de los modernos peces celacantos no fue menos sorprendente.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Historia de peces

24.1 ¿Cuáles son las características distintivas de los cordados?

Todos los cordados comparten cuatro estructuras distintivas
Los cordados invertebrados habitan en los mares
Los vertebrados tienen espina dorsal

24.2 ¿Cuáles son los principales grupos de vertebrados?

Algunos vertebrados carecen de mandíbulas
Los peces con mandíbulas dominan las aguas de la Tierra
Los anfibios tienen una doble vida
Guardián de la Tierra: Ranas en peligro
Los reptiles y las aves se han adaptado a la vida terrestre
Los mamíferos producen leche para sus crías

Conexiones evolutivas: ¿Los seres humanos son un éxito biológico?

Enlaces con la vida: ¿Los animales pertenecen a los laboratorios?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Historia de peces

ESTUDIO DE CASO HISTORIA DE PECES

MARJORIE COURTNEY-LATIMER recibió una llamada telefónica el 22 de diciembre de 1938, la cual la llevaría a uno de los descubrimientos más espectaculares en la historia de la biología. La llamada era de un pescador de la localidad a quien Courtney-Latimer, la curadora de un pequeño museo en Sudáfrica, le había encargado que reuniera algunos especímenes de peces para el museo. Su bote acababa de regresar de un viaje y estaba esperando en el muelle de la población. Courtney-Latimer se dirigió al muelle donde estaba anclado el bote y empezó a buscar entre los pescados que estaban colocados sobre la cubierta. Más tarde, ella escribiría lo siguiente: "Observé una aleta azul que sobresalía del montón de pescados. Saqué el ejemplar y ¡qué sorpresa, era el pescado más hermoso que jamás haya visto!" Además de su belleza, el pescado presentaba características extrañas, incluidas las aletas gruesas y lobulares, a diferencia de las aletas de cualquier otra especie viva.

Marjorie no había reconocido a este extraño pescado, pero sabía que era inusual. Trató de encontrar un sitio para refrigerarlo, pero en esta población tan pequeña no pudo encontrar un comercio que tuviera un refrigerador grande y que quisiera guardarlo. Finalmente, logró salvar sólo la piel. Se dio a la tarea de hacer algunos dibujos del ejemplar y los utilizó para tratar de identificarlo. Para su sorpresa, la criatura no se parecía a ninguna otra especie conocida que habitara en aguas sudafricanas, pero se parecía a los miembros de una familia de peces conocidos como celacantos. El único problema con esta evaluación era que los celacantos eran reconocidos sólo como fósiles. Los fósiles más primitivos de celacantos se encontraron en rocas que tenían 400 millones de años de antigüedad y, como todos sabían, este grupo se había extinguido hacía unos ¡80 millones de años!

Courtney-Latimer, un tanto desconcertada, envió sus dibujos a J. L. B. Smith, un ictiólogo de la Universidad de Rhodes. Smith se asombró al ver los dibujos y más tarde escribió: "Parecía como si una bomba hubiera estallado en mi cerebro." Aunque amargamente desilusionado por el hecho de que no se hubieran conservado los huesos y los órganos internos del ejemplar, Smith solicitó ver la piel que se había conservado en refrigeración. Finalmente, pudo confirmar la asombrosa noticia de que los celacantos todavía nadan en las aguas de nuestro planeta.

24.1 ¿CUÁLES SON LAS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LOS CORDADOS?

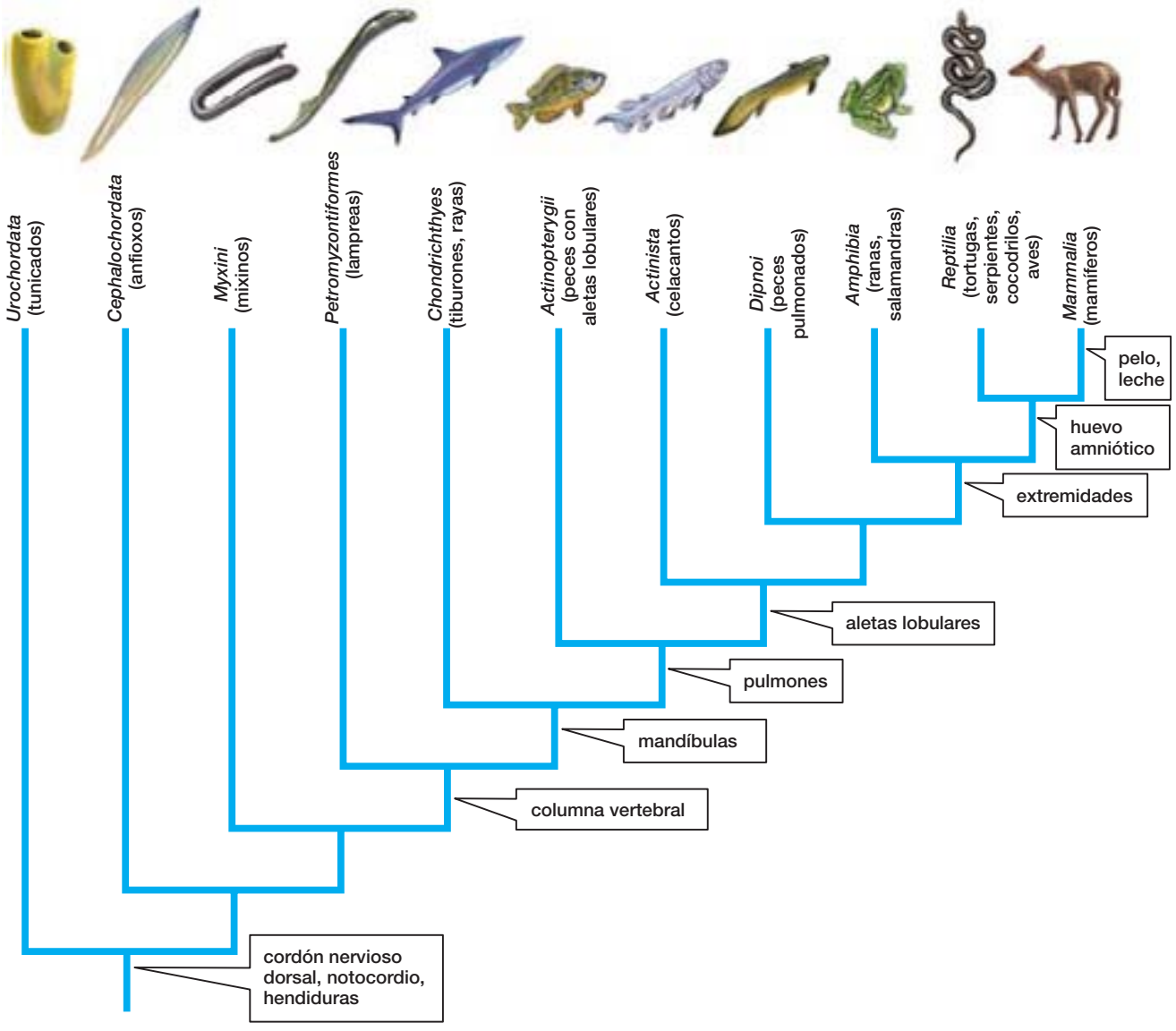
Tanto por el número de especies como por el número de individuos, los animales que habitan la Tierra son abrumadoramente invertebrados, es decir, carecen de huesos. No obstante, cuando pensamos en los animales tendemos a suponer que son **vertebrados**, como peces, reptiles, anfibios, aves y mamíferos. Nuestra predilección por los vertebrados surge en parte porque, en comparación con los invertebrados, en general son más grandes y más notorios; una persona simplemente reconoce con mayor facilidad un cuervo o una ardilla que un gusano plano o una almeja. Pero nuestra afinidad por los vertebrados surge también de su parecido con nosotros, porque, después de todo, somos vertebrados.

Todos los cordados comparten cuatro estructuras distintivas

Los humanos somos miembros del filum Chordata (**FIGURA 24-1**), que compartimos no solamente con aves y monos, sino también con los tunicados (ascidias o jeringas de mar) y con pequeñas criaturas parecidas a peces llamados anfioxos. ¿Qué características compartimos con estas criaturas que son tan diferentes de nosotros? Todos los cordados presentan desarrollo de deuterostoma (que es también una característica de los equinodermos; véase el capítulo 23) y además están unidos por cuatro características que poseen en cierta etapa de su vida: un cordón nervioso dorsal hueco, un notocordio, unas hendiduras branquiales faríngeas y una cola post-anal.

Cordón nervioso dorsal hueco

El **cordón nervioso** de los cordados es hueco y está sobre el tracto digestivo, que se extiende a lo largo de la porción dorsal (superior) del cuerpo. En contraste, los cordones nerviosos de otros animales son sólidos y están en la posición ventral, debajo del tracto digestivo (véase las figuras 23-11 y 23-13). Durante el desarrollo embrionario de los cordados, el cordón nervioso desarrolla un engrosamiento en su extremo anterior que constituye el cerebro.



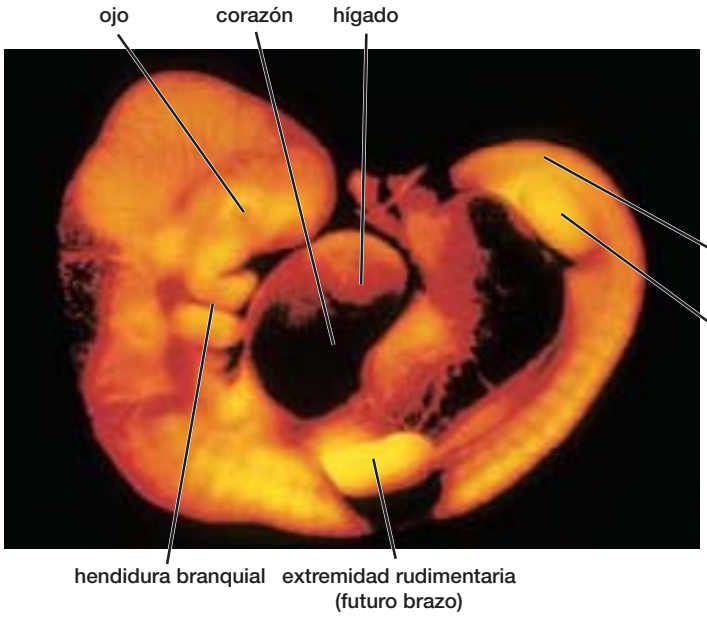


FIGURA 24-2 Características de los cordados en el embrión humano
El embrión humano de 5 semanas mide aproximadamente 1 centímetro de longitud y muestra claramente una cola y hendiduras branquiales externas (llamadas surcos con más propiedad, ya que no penetran la pared corporal). Aunque la cola desaparecerá completamente, los surcos branquiales contribuyen a la formación de la mandíbula inferior.

Notocordio

El **notocordio** es un cilindro rígido, pero flexible, situado entre el tracto digestivo y el cordón nervioso, que se extiende a lo largo del cuerpo. Brinda apoyo al cuerpo y un sitio de sujeción para los músculos. En muchos cordados, el notocordio está presente sólo durante las etapas tempranas del desarrollo y desaparece al formarse el esqueleto.

Hendiduras branquiales faríngeas

Las **hendiduras branquiales faríngeas** están situadas en la faringe (la cavidad que está detrás de la boca). Pueden formar aberturas branquiales (órganos para el intercambio de gases), o bien, aparecer sólo como surcos en una etapa temprana del desarrollo.

Cola post-anal

La parte posterior del cuerpo de un cordado se extiende más allá del ano para formar una **cola post-anal**. Otros animales carecen de este tipo de cola, porque su tracto digestivo se prolonga a todo lo largo del cuerpo.

Esta lista de las estructuras características de los cordados podría parecer extraña porque, aunque somos cordados, a primera vista parecería que nos faltan todas las características con excepción del cordón nervioso. Pero las relaciones evolutivas a veces parecen ser más claras durante las etapas tempranas del desarrollo, y es durante nuestra vida embrionaria que desarrollamos, y perdemos, el notocordio, las hendiduras branquiales y la cola (**FIGURA 24-2**). Los seres humanos compartimos estos elementos de los cordados con todos los demás vertebrados y con dos grupos de cordados invertebrados, los anfioxos y tunicados.

Los cordados invertebrados habitan en los mares

arena del fondo marino, filtrando diminutas partículas de alimento del agua. Como se observa en la **FIGURA 24-3A**, las cuatro características de los cordados están presentes en el anfioxo adulto.

Los tunicados forman un grupo más grande de invertebrados cordados marinos que incluye las ascidias o jeringas de mar. Es difícil imaginar un pariente menos parecido a los seres humanos que la inmóvil ascidia, con forma de jarrón y que filtra su alimento (**FIGURA 24-3b**). Su capacidad para moverse se limita a contracciones de su cuerpo en forma de saco, el cual puede lanzar un chorro de agua de mar a quien trate de sacarlo de su hábitat submarino; de ahí su nombre de jeringa de mar. Aunque los ejemplares adultos son inmóviles, sus larvas nadan activamente y poseen las cuatro características de los cordados (véase la figura 24-3b).

Los vertebrados tienen espina dorsal

En los vertebrados, el notocordio embrionario es remplazado normalmente durante el desarrollo por una espina dorsal o columna vertebral. La **columna vertebral** está formada de huesos o **cartílagos**; estos últimos están constituidos por un tejido que se parece al hueso pero que es menos quebradizo y más flexible. La columna vertebral da apoyo al cuerpo, ofrece sitios de sujeción para los músculos, y protege al delicado cordón nervioso y al cerebro. También es parte del esqueleto interno vivo que puede crecer y repararse por sí solo. Puesto que el esqueleto interno brinda apoyo sin tener el peso de una armadura como el del exoesqueleto de los artrópodos, esto ha permitido a los vertebrados alcanzar un gran tamaño y tener movilidad.

Los vertebrados muestran otras adaptaciones que han contribuido a invadir con éxito la mayoría de los hábitat. Una de estas adaptaciones son los pares de apéndices, los cuales aparecieron primero como aletas en los peces y sirvieron como estabilizadores para nadar. Durante millones de años, algunas aletas se modificaron por medio de la selección natural hasta convertirse en patas, las cuales permitieron a los animales arrastrarse en tierra seca, y posteriormente en alas que les permitieron volar. Otra adaptación que ha contribuido al éxito de los vertebrados es el crecimiento y la complejidad del cerebro, así como de las estructuras sensoriales, lo que les ha permitido percibir detalladamente el ambiente y responder a éste en una gran variedad de formas.

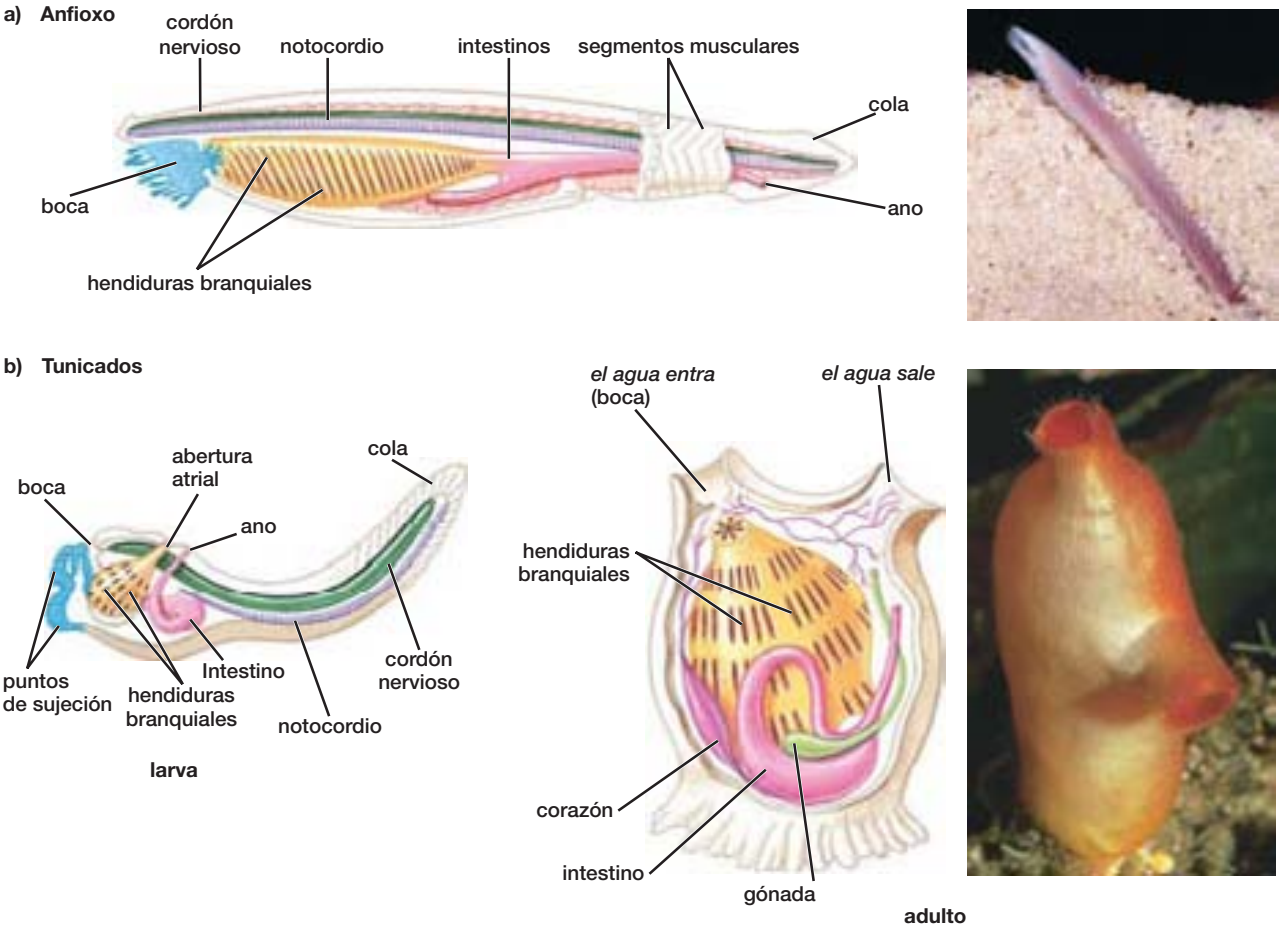


FIGURA 24-3 Cordados invertebrados

Esquema de un anfioxo, un cordado invertebrado con forma de pez. El organismo adulto presenta todas las características propias de los cordados. ***b)*** Esta larva de asicidia (izquierda) también presenta todas las características de los cordados. La ascidia adulta (un tipo de tunicado, centro) ha perdido su cola y el notocordio, y ha adoptado una vida sedentaria, como se muestra en la fotografía (derecha).

24.2 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES GRUPOS DE VERTEBRADOS?

El ancestro evolutivo de los vertebrados probablemente fue un organismo similar a los anfioxos actuales. Los vertebrados primitivos más conocidos, cuyos fósiles se encontraron en rocas de 530 millones de años de antigüedad, se parecían a los anfioxos, pero tenían cerebro, cráneo y ojos. En la actualidad, los vertebrados incluyen lampreas, peces cartilaginosos, peces óseos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos.

Algunos vertebrados carecen de mandíbulas

Las bocas de los vertebrados más primitivos no contaban con mandíbulas. La historia inicial de los vertebrados se caracterizó por un conjunto de extraños peces sin mandíbula, ahora ya extintos, muchos de los cuales estaban protegidos por una armadura de placas óseas. En la actualidad sobreviven dos grupos de peces sin mandíbulas: los mixinos (clase Myxini) y las lampreas (clase Petromyzontiformes). Aunque tanto los mixinos como las lampreas tienen cuerpo como de anguila y piel lisa y sin escamas, los dos grupos representan ramas primitivas distintas del árbol evolutivo de los cordados. La rama que dio origen a los mixinos actuales es la más antigua de las dos.

Los mixinos son residentes de piel resbaladiza del lecho marino

El cuerpo de los mixinos es rígido debido al notocordio, pero su "esqueleto" se limita a unos cuantos elementos cartilaginosos, uno de los cuales forma una caja encefálica rudimentaria. Puesto que los mixinos carecen de elementos esqueléticos que rodean y dan protección al cordón nervioso, la mayoría de los sistemáticos no los consideran como vertebrados, sino como representantes del grupo de cordados más estrechamente emparentado con los vertebrados.

Los mixinos son exclusivamente marinos (**FIGURA 24-4a**). Viven cerca del lecho marino, donde suelen excavar para enterrarse y se alimentan principalmente de gusanos. Sin embargo, también atacan con avidez a los peces muertos o moribundos con sus dientes que parecen tenazas y con los cuales horadan el cuerpo de su presa y consumen los órganos internos blandos. Los pescadores miran a los mixinos con mucho desagrado porque secretan grandes cantidades de una sustancia mucilaginosa como defensa contra los depredadores. Pese a su bien ganada reputación de "bolas de moco del mar", los mixinos son buscados ávidamente por muchos pescadores comerciales porque la industria peletera de ciertas partes el mundo constituye un mercado para la piel de mixino. La mayoría de los objetos de piel que se venden como si fueran de "piel de anguila" en realidad se elaboran con piel de mixino curtida.

a)

b)

FIGURA 24-4 Peces sin mandíbulas
a) Los mixinos habitan en madrigueras compartidas en el lodo y se alimentan de gusanos poliquetos. ***b)*** Algunas lampreas son parásitas, se adhieren a los peces (como esta carpa) con su boca parecida a una ventosa y recubierta de dientes raspadores (imagen en recuadro).

a)

b)

FIGURA 24-5 Peces cartilaginosos
a) Un tiburón tigre muestra varias hileras de dientes. Conforme los dientes más externos se van perdiendo, son sustituidos por los nuevos que se forman detrás. Tanto los tiburones como las rayas carecen de vejiga natatoria y tienden a hundirse hacia el fondo cuando dejan de nadar. ***b)*** La mantarraya tropical de manchas azules nada mediante gráciles ondulaciones de las extensiones laterales de su cuerpo.

Algunas lampreas son parásitos de los peces

Se reconoce a una lamprea por la ventosa larga y redonda que rodea su boca y por la única ventana nasal en la parte superior de la cabeza. El cordón nervioso de una lamprea está protegido por segmentos de cartílago, por lo que la lamprea se considera como un verdadero vertebrado. Vive tanto en agua dulce como salada, pero las formas marinas deben regresar al agua dulce para depositar sus huevos.

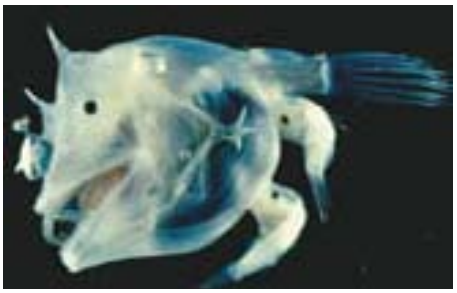
Algunas especies de lampreas son parásitas. La lamprea parásita tiene una boca recubierta de dientes con los cuales se adhiere a los peces grandes (**FIGURA 24-4b**). Por medio de los dientes raspadores de su lengua, la lamprea hace un orificio en la pared corporal de su huésped, a través del cual succiona la sangre y los líquidos corporales. A partir de la década de 1920, las lampreas se dispersaron por los Grandes Lagos de Estados Unidos, donde, en ausencia de depredadores eficientes, se han multiplicado considerablemente y han reducido en gran medida las poblaciones de peces comerciales, incluida la trucha lacustre. Se han puesto en marcha fuertes medidas correctivas para controlar la población de lampreas, con lo cual se ha logrado cierta recuperación de otras poblaciones de peces que habitan en los Grandes Lagos.

Los peces con mandíbulas dominan las aguas de la Tierra

Hace aproximadamente 425 millones de años, los peces sin mandíbulas, los ancestros de las lampreas y mixinos, dieron origen a un grupo de peces que presentaban una nueva e importante estructura: las mandíbulas. Éstas permitieron a los peces sujetar, rasgar y triturar a sus presas, lo que les permitió explotar una amplia variedad de fuentes de alimento, que los peces sin mandíbulas no podían aprovechar. Aunque las formas primitivas de los peces con mandíbulas se extinguieron hace 230 millones de años, dieron origen a los grupos de peces con mandíbulas de la actualidad: los peces cartilaginosos, los peces óseos y los peces lobulados.

Los peces cartilaginosos son depredadores marinos

La clase Chondrichthyes, cuyo nombre significa “peces de cartílago” en griego, incluye 625 especies marinas, entre ellas los tiburones, las rayas y las mantarrayas (**FIGURA 24-5**). Estos peces cartilaginosos son elegantes depredadores que carecen de huesos y cuyo esqueleto es de cartílago en su totalidad.



a)

b)

c)

FIGURA 24-6 Diversidad de los peces óseos
Los peces óseos han colonizado casi todos los hábitat acuáticos. ***a)*** Este pejesapo hembra de aguas profundas atrae a sus presas con un señuelo vivo que se extiende inmediatamente arriba de su boca. El pez es de un blanco fantasmal porque a los 2000 metros de profundidad donde habitan los pejesapos, la luz no penetra y, por consiguiente, los colores son innecesarios. Los pejesapos machos son muy pequeños y se adhieren a la hembra como parásitos permanentes, siempre a su disposición para fecundar los huevecillos. Se observan dos machos parásitos adheridos a esta hembra. ***b)*** Esta morena verde tropical vive en las grietas de las rocas. Un pequeño pez (un gobi rayado limpiador) que está sobre su mandíbula inferior devora a los parásitos que se aferran a la piel de la morena. ***c)*** El caballito de mar tropical se ancla con su cola prensil (adaptada para sujetarse firmemente) mientras se alimenta de pequeños crustáceos. PREGUNTA: En relación con la regulación del agua (es decir, la conservación de la cantidad adecuada de agua en el cuerpo), ¿cómo difiere el desafío que enfrenta un pez de agua dulce del que debe enfrentar un pez de agua salada?

El cuerpo está protegido por una piel correosa a la que unas diminutas escamas le imparten aspereza. Los miembros de este grupo respiran por medio de branquias. Aunque algunos necesitan nadar para que el agua circule por las branquias, la mayoría de ellos bombean agua a través de los órganos respiratorios. Al igual que todos los peces, los cartilaginosos tienen un corazón de dos cámaras. Algunos peces cartilaginosos son muy grandes. Un tiburón ballena, por ejemplo, puede crecer hasta alcanzar más de 15 metros de longitud, y una mantarraya puede llegar a medir más de 7 metros de ancho y registrar un peso de 1300 kilogramos.

Aunque algunos tiburones se alimentan filtrando el plancton (formado por animales y algas diminutos) del agua, la mayoría de ellos son depredadores temibles que buscan presas mayores como otros peces, mamíferos marinos, tortugas de mar, cangrejos y calamares. Muchos tiburones atacan a su presa con sus poderosas mandíbulas que contienen varias hileras de dientes tan filosos como una navaja; la hilera posterior se mueve hacia delante conforme pierden los dientes frontales al ir envejeciendo y por el uso (véase la figura 24-5a).

La mayoría de los tiburones evitan al hombre, pero los grandes ejemplares de algunas especies resultan peligrosos para los nadadores y buzos. Sin embargo, los ataques de tiburón a los seres humanos son escasos. Es 30 veces más probable que un residente de Estados Unidos muera por la acción de un relámpago que por el ataque de un tiburón, y una persona en la playa tiene mucha mayor probabilidad de morir ahogada que por el ataque de un tiburón. No obstante, los ataques de tiburones sí ocurren. En Estados Unidos, durante el año 2004, por ejemplo, se documentaron 30 casos de ataques, dos de ellos fatales.

Las mantas y las mantarrayas habitan principalmente en el lecho marino, tienen el cuerpo plano, aletas en forma de alas y una cola delgada (véase la figura 24-5b). La mayoría de las mantas y mantarrayas se alimentan de invertebrados. Algunas especies se defienden por medio de una espina situada cerca de la cola, con la cual pueden provocar heridas graves, mientras que otras generan una potente descarga eléctrica, capaz de paralizar a la presa.

Los peces óseos son los vertebrados más variados

Del mismo modo en que el sesgo de observación con base en el tamaño nos induce a pasar por alto los grupos de invertebrados más variados, nuestro sesgo con base en el hábitat no nos permite advertir la gran diversidad de vertebrados. Los vertebrados más variados y abundantes no son las aves ni los mamíferos, predominantemente terrestres. Los vertebrados que ocupan el primer lugar en diversidad pertenecen a los océanos y lagos, los peces óseos (clase Actinopterygii). Se han identificado aproximadamente 24,000 especies y los científicos estiman que quizá exista el doble de esa cantidad, incluidas las especies que habitan en aguas profundas y en lugares remotos. Estos peces óseos se encuentran en casi todo hábitat acuático, tanto de agua dulce como de agua salada.

Los peces óseos se distinguen por la estructura de sus aletas, la cuales están formadas por tejido de piel sostenido por espinas óseas. Además, los peces óseos tienen un esqueleto formado por huesos, una característica que comparten con los peces de aletas lobulares y los vertebrados con extremidades que se explicarán más adelante en este capítulo. La piel de los peces óseos está recubierta de escamas entretejidas que les brindan protección y flexibilidad al mismo tiempo. La mayoría de las mantarrayas tienen una vejiga natatoria, una especie de globo interno que les permite flotar sin ningún esfuerzo a cualquier nivel. La vejiga evolucionó a partir de los pulmones, que estaban presentes (junto con las branquias) en los antepasados de los actuales peces óseos.

Los peces óseos incluyen no sólo un gran número de especies, sino también a una amplia variedad de formas y modos de vida (**FIGURA 24-6**). Esta gama comprende formas que van desde las anguilas hasta los lenguados planos; desde los ejemplares lentos que se alimentan en el fondo del mar hasta los veloces depredadores de forma aerodinámica que habitan en mar abierto; desde los peces de colores brillantes que habitan en los arrecifes hasta los transparentes y luminiscentes que habitan en los mares profundos; desde los animales que pesan casi 1500 kilogramos hasta los peces diminutos que pesan cerca de 1 miligramo.

a) b)

FIGURA 24-7 Los peces pulmonados tienen aletas lobulares
Entre los peces, ***a)*** los peces pulmonados constituyen el grupo que está más estrechamente emparentado con los vertebrados terrestres. ***b)*** El pez pulmonado puede esperar durante largos periodos secos enterrado en su madriguera de lodo.

Los peces óseos son una fuente de alimento extremadamente importante en términos de cantidad para los seres humanos. Por desgracia, nuestro apetito por estos peces, aunado a los modernos y eficientes métodos para localizarlos y pescarlos, ha generado un efecto devastador en sus poblaciones. Los biólogos han informado que las poblaciones de casi todos las especies de peces óseos económicamente importantes han disminuido de manera drástica. Los peces depredadores grandes como el atún y el bacalao se ven severamente afectados; las poblaciones actuales de estas especies contienen ahora menos del 10 por ciento de los números que se registraban antes de que la pesca comercial. Si continúa la pesca excesiva, las existencias de peces con toda seguridad sufrirán un colapso. La solución a este problema, pescar menos peces, es sencilla en teoría pero muy difícil en la práctica, por factores tanto económicos como políticos.

Los peces de aletas lobulares incluyen a los parientes vivos más cercanos de tetrápodos

Aunque casi todos los peces con esqueleto pertenecen al grupo de peces óseos, algunos de éstos son miembros de un grupo diferente, los peces con aletas lobulares. Estos últimos tienen aletas carnosas que contienen huesos en forma de espina rodeados de una capa gruesa de músculo. Los peces vivos con esta característica constituyen en realidad dos linajes distintos que han evolucionado por separado durante cientos de millones de años. Un linaje incluye a los celacantos (Actinista), de los que se habla con más detalle en el estudio de caso de este capítulo (véase la fotografía en la página que abre el capítulo). El otro linaje incluye los peces pulmonados (Dipnoi), de los cuales sólo han sobrevivido seis especies hasta estos tiempos modernos (**FIGURA 24-7a**). Estos supervivientes son los parientes vivos más cercanos de los tetrápodos, los cuales, en lugar de aletas, tienen extremidades que pueden sostener su peso en tierra firme; también poseen dedos al final de esas extremidades.

Los peces pulmonados, que se encuentran en ambientes de agua dulce en África, Sudamérica y Australia, poseen branquias y pulmones. Tienden a vivir en aguas estancadas con escasa cantidad de oxígeno, y sus pulmones les permiten abastecerse de este gas extrayéndolo directamente del aire. Las diversas especies de peces pulmonados pueden sobrevivir aun si el estanque donde habitan se seca por completo. Se entierran en el lodo y forman un aislamiento en una cámara con un revestimiento mucoso (**FIGURA 24-7b**). Ahí, respiran por medio de sus pulmones y su tasa metabólica declina drásticamente. Cuando regresan las lluvias y el estanque se reabastece de agua, los peces pulmonados salen de su escondite y reanudan su modo de vida subacuática.

Además de los celacantos y los peces pulmonados, en la historia evolutiva de los peces con mandíbulas surgieron en forma temprana otros linajes de peces con aletas lobulares. Algunos grupos primitivos de peces con aletas lobulares desarrollaron aletas carnosas modificadas, las cuales, en una emergencia, podían servir como pies para que el pez pudiera arrastrase de un estanque casi seco a otro que tuviera más agua. Por el estudio de los fósiles sabemos que al menos una especie desarrolló extremidades reales, aunque la función de éstas en los organismos acuáticos aún no se comprende del todo. Un grupo de tales ancestros finalmente dio origen a los vertebrados que hicieron el primer intento de invadir la tierra firme: los anfibios.

Los anfibios tienen una doble vida

Las 4800 especies de anfibios (clase Amphibia) constituyen un puente entre la existencia acuática y la terrestre (**FIGURA 24-8**). Las extremidades de los anfibios muestran diversos grados de adaptación al movimiento sobre la tierra, desde las salamandras que se arrastran con el vientre pegado al suelo hasta las ranas y sapos que se desplazan dando largos saltos. Un corazón de tres cámaras (en contraste con el corazón de dos cámaras de los peces) hace circular la sangre con más eficiencia, y la mayoría de los adultos tienen pulmones en vez de branquias. Sin embargo, los pulmones de los anfibios están poco desarrollados y necesitan el complemento aportado por la piel, la cual sirve como órgano respiratorio adicional. Esta función respiratoria exige que la piel se conserve húmeda, una limitante que restringe considerablemente la variedad de hábitat terrestres para los anfibios.

Los anfibios también están atados a los hábitat húmedos por su comportamiento de apareamiento, que necesita del agua. Normalmente la fecundación es externa y, por lo tanto, debe tener lugar en el agua para que los espermatozoides naden hacia los óvulos. Éstos deben conservarse húmedos, pues su única protección es un recubrimiento gelatinoso que los deja inermes ante la pérdida de agua por evaporación. Los medios para conservar la humedad de los óvulos varían considerablemente entre las diferentes especies de anfibios, pero muchas de ellas simplemente depositan los óvulos en agua. En

GUARDIÁN DE LA TIERRA — Ranas en peligro

Las ranas y los sapos han habitado los estanques y pantanos de la Tierra durante cerca de 150 millones de años y, de algún modo, sobrevivieron a la catástrofe del cretácico que provocó la extinción de los dinosaurios y de tantas otras especies hace alrededor de 65 millones de años. Sin embargo, su longevidad evolutiva no parece ofrecer una defensa adecuada contra los cambios ambientales generados por las actividades humanas. A lo largo de la última década, los herpetólogos (los biólogos que estudian los reptiles y anfibios) de todo el mundo documentaron una alarmante reducción de las poblaciones de anfibios. Miles de especies de ranas, sapos y salamandras están experimentando una impresionante disminución y, al parecer, muchas se han extinguido.

Este fenómeno no es de carácter local; se ha informado de fuertes descensos en las poblaciones de todas partes del mundo. Los sapos de Yosemite y las ranas de patas amarillas están desapareciendo de las montañas de California; las salamandras tigre prácticamente se han exterminado en las Montañas Rocallosas de Colorado; las ranas leopardo, perseguidas con entusiasmo por los niños, se están convirtiendo en una rareza en Estados Unidos. La tala de árboles destruye los hábitat de los anfibios desde el noroeste del Pacífico hasta el trópico (**FIGURA E24-1**), pero incluso los anfibios de las zonas protegidas están muriendo. En la Reserva del Bosque Nuboso de Monteverde, en Costa Rica, el sapo dorado era común a principios de la década de 1980, pero no se le ha vuelto a ver desde 1989. La rana de incubación gástrica de Australia fascinaba a los biólogos porque se tragaba sus huevos, los incubaba en el estómago y más tarde regurgitaba las crías totalmente formadas. Esta especie era abundante y parecía estar a salvo en un parque nacional. De improviso, en 1980, la rana de incubación gástrica desapareció y no se le ha visto desde entonces.

Las causas de la disminución mundial de la diversidad de los anfibios no se conocen con certeza, pero los investigadores han descubierto recientemente que las ranas y los sapos de muchos lugares están sucumbiendo ante una infección por un hongo patógeno. Se ha encontrado el hongo en la piel de ranas muertas y moribundas en localidades muy distantes unas de otras, como Australia, América Central y el oeste de Estados Unidos. En esos lugares el descubrimiento del hongo ha coincidido con la mortandad masiva de ranas y sapos, y casi todos los herpetólogos están de acuerdo en que el hongo está provocando las muertes.

Sin embargo, parece poco probable que el hongo por sí solo sea la causa de la disminución mundial de los anfibios. Para empezar, se ha registrado mortandad en lugares en donde no se ha encontrado el hongo. Además, muchos herpetólogos piensan que la epidemia micótica no habría surgido si las ranas y sapos no hubieran estado debilitados previamente por otras causas. Así que, si no es el hongo por sí solo la causa de todo el daño, ¿cuáles son las otras causas posibles de la disminución de los anfibios? Todas las causas más probables tienen que ver con la modificación de la biosfera —la parte de la Tierra en la que hay vida— provocada por los seres humanos.

La destrucción de los hábitat, en especial el drenado de los pantanos, que son idóneos para la vida de los anfibios, es una de las causas principales de la disminución. Los anfibios también son muy vulnerables a las sustancias tóxicas del ambiente. Por ejemplo, los investigadores encontraron que las ranas expuestas a cantidades traza de atrazine (un herbicida que se utiliza comúnmente y que se encuentra en casi todos los cuerpos de agua dulce de Estados Unidos) sufrieron severos daños en sus tejidos reproductores. La biología singular de los anfibios los hace especialmente vulnerables a los tóxicos en el ambiente. El cuerpo de los anfibios en todas sus etapas vitales está protegido sólo por una capa delgada y permeable de piel que los contaminantes pueden penetrar con facilidad. Para empeorar las cosas, la doble vida de muchos anfibios expone su piel permeable a una amplia gama de hábitat acuáticos y terrestres y, por consiguiente, a una gran diversidad de toxinas ambientales.

Los huevos de los anfibios también pueden resultar dañados por la luz ultravioleta (UV), de acuerdo con las investigaciones realizadas por Andrew Blaustein, un ecólogo de la Universidad Esta-

a)

b)

c)

FIGURA 24-8 "Anfibio" significa "doble vida"
Una ilustración de la doble vida de los anfibios es la transición ***a)*** del renacuajo larvario totalmente acuático a ***b)*** la rana adulta que lleva una vida semiterrestre. ***c)*** La salamandra roja vive exclusivamente en hábitat húmedos de la parte oriental de Estados Unidos. Al nacer, las salamandras tienen una forma que se asemeja mucho a la de los individuos adultos. PREGUNTA: ¿Qué ventajas obtienen los anfibios a partir de su "doble vida"?

tal de Oregon. Blaustein demostró que los huevos de algunas especies de ranas del noroeste del Pacífico son sensibles a la luz ultravioleta y que las especies más sensibles son las que están disminuyendo de manera más drástica. Por desgracia, muchas regiones de la Tierra están sujetas a niveles cada vez más intensos de radiación UV, porque los contaminantes atmosféricos han provocado el adelgazamiento de la capa protectora de ozono.

Otra tendencia inquietante que se observa entre las ranas y los sapos es el aumento de la incidencia de individuos con deformaciones grotescas. Los investigadores de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA) demostraron recientemente que las ranas en desarrollo expuestas a niveles naturales de luz UV crecían con las extremidades deformadas con más frecuencia que las que estaban protegidas contra los rayos UV. Otros investigadores han demostrado que las deformidades son más frecuentes en las ranas expuestas a bajas concentraciones de los pesticidas de uso común. Además, hay creciente evidencia que sugiere que algunas deformidades, especialmente la más común, la aparición de una extremidad adicional, son causadas por infecciones parasitarias durante el desarrollo embrionario. Muchas ranas con una extremidad extra están infestadas por un gusano plano parásito, y los investigadores han demostrado que los renacuajos infectados con gusanos planos de manera experimental en el laboratorio desarrollaron deformidades en la adultez. ¿Por qué estos parásitos, que han coexistido tanto tiempo con las ranas, de repente empiezan a causarles tantas deformaciones? Una explicación probable es que la exposición a los rayos UV, pesticidas y herbicidas ha debilitado el sistema inmunitario de las ranas, lo cual hace que los renacuajos en desarrollo sean más vulnerables al ataque de las infecciones parasitarias.

Muchos científicos piensan que las dificultades por las que atraviesan los anfibios son indicio de un deterioro general de la capacidad de nuestro planeta para sustentar la vida. Según este razonamiento, los muy sensibles anfibios están advirtiendo de forma temprana sobre la degradación ambiental que terminará por afectar también a los organismos más resistentes. Igualmente preocupante es la observación de que los anfibios no sólo son indicadores sensibles de la salud de la biosfera, sino también son componentes importantísimos de muchos ecosistemas, ya que mantienen las poblaciones de insectos bajo control y, a la vez, sirven de alimento a carnívoros más grandes. Su disminución trastornará aún más el equilibrio de estas delicadas comunidades.

La ecóloga Margaret Stewart, de la Universidad Estatal de Nueva York, en Albany, resume acertadamente el problema: Hay un dicho famoso entre los ecólogos y ambientalistas: "Todo está relacionado con todo lo demás… No se puede exterminar un componente del sistema sin observar cambios impresionantes en otras partes del sistema".

FIGURA E24-1 Anfibios en peligro
El sapo corroborí, que aquí aparece en medio de sus huevos, está desapareciendo rápidamente de su nativa Australia. Los renacuajos se desarrollan dentro de los huevos. La delgada piel del adulto y el recubrimiento gelatinoso que envuelve los huevos, ambos permeables al agua y a los gases, hacen vulnerables tanto al adulto como a los huevos a los contaminantes del aire y del agua.

a) b) c)

FIGURA 24-9 Diversidad de los reptiles
a) La víbora real de montaña tiene un diseño coloreado muy semejante al de la venenosa serpiente coralillo, de manera que sus posibles depredadores la evitan. Así, la inofensiva víbora real logra eludir a los depredadores. ***b)*** La apariencia externa del caimán americano, que habita en las zonas pantanosas del sur de Estados Unidos, es casi idéntica a la de los caimanes fósiles de 150 millones de años de antigüedad. ***c)*** Las tortugas de las islas Galápagos, en Ecuador, llegan a vivir más de 100 años.

algunas especies de anfibios, los óvulos fecundados se transforman en larvas acuáticas, como los renacuajos de ciertas ranas y sapos. Estas larvas acuáticas experimentan una drástica transformación para convertirse en adultos semiterrestres, una metamorfosis que explica el nombre de anfibios, término que significa "doble vida". Su doble vida y su delgada piel permeable hacen a los anfibios particularmente vulnerables a los contaminantes y a la degradación ambiental, como se describe en la sección "Guardianes de la Tierra: Ranas en peligro."

Los reptiles y las aves se han adaptado a la vida terrestre

Los reptiles incluyen a los lagartos, las serpientes, los caimanes, los cocodrilos, las tortugas (**FIGURA 24-9**) y las aves. Los

reptiles evolucionaron a partir de un antepasado anfibio hace alrededor de 250 millones de años. Los reptiles primitivos, los dinosaurios, dominaron la Tierra durante cerca de 150 millones de años.

Los reptiles tienen escamas y huevos con cascarón

Algunos reptiles, particularmente los que habitan en los desiertos, como las tortugas y los lagartos, son completamente independientes de sus orígenes acuáticos. Esta independencia se consiguió mediante una serie de adaptaciones, de las cuales sobresalen tres: **1.** una piel dura y escamosa que impide la pérdida de agua y protege el cuerpo; **2.** la fecundación interna, en la cual el macho deposita espermatozoides dentro del cuerpo de la hembra; y **3.** un **huevo amniótico** con cascarón que puede enterrarse en la arena o tierra, lejos del agua y los hambrientos depredadores. El cascarón impide la desecación del huevo en la tierra. Una membrana interna, el **amnios**, encierra al embrión en el medio acuoso que necesita todo animal en desarrollo (**FIGURA 24-10**).

Además de estos elementos, los pulmones de los reptiles son más eficientes que los de los vertebrados más primitivos, por lo que ya no es necesaria la piel como órgano respiratorio. El corazón de tres cámaras se modificó para permitir una mejor separación de la sangre oxigenada de la desoxigenada, y las extremidades y el esqueleto adquirieron características que brindan un mejor sostén y aumentan la eficiencia de los movimientos en tierra.

Los lagartos y las serpientes comparten una herencia evolutiva

Los lagartos y las serpientes, en conjunto, forman un linaje distinto que incluye cerca de 6800 especies. El ancestro común de las serpientes y los lagartos tenía extremidades, las cuales subsisten en la mayoría de los lagartos, pero que se perdieron en las serpientes. El ancestro con extremidades de las serpientes se conoce por los remanentes de huesos de las extremidades traseras que están presentes en algunas especies.

La mayoría de los lagartos son depredadores pequeños que comen insectos u otros invertebrados pequeños, pero algunas especies son bastante grandes. El dragón de Komodo, por ejemplo, puede llegar a medir 3 metros de longitud y pesar casi 100 kilogramos. Este saurio gigante habita en Indonesia y cuenta con poderosas mandíbulas y dientes de 2.5 centímetros de largo con los que ataca a sus presas, como ciervos, cabras y cerdos.

FIGURA 24-10 El huevo amniótico
Una lagartija anole lucha para salir de su huevo. El huevo amniótico encapsula al embrión en desarrollo en una membrana llena de líquido (el amnios) para garantizar que se desarrolle en un medio acuoso, incluso cuando el huevo está lejos del agua.

Sin embargo, el dragón de Komodo no depende sólo de sus dientes para matar a su presa. Su boca alberga más de 50 especies diferentes de bacterias, muchas de las cuales son dañinas para los animales. Cuando un animal es mordido por un dragón de Komodo, no se muere de inmediato, sino que es probable que adquiera una infección la cual terminará por matarlo en unos cuantos días. El dragón simplemente espera con paciencia a que muera la presa herida. ¿Por qué el dragón de Komodo no resulta dañado por las bacterias mortíferas que habitan en su boca? La sangre de este animal contiene compuestos antimicrobianos que aparentemente lo protegen contra las infecciones.

La mayoría de las serpientes son activos depredadores carnívoros y tienen una variedad de adaptaciones que les ayudan a conseguir el alimento. Por ejemplo, muchas serpientes tienen órganos sensoriales especiales que les ayudan a seguir la huella de las víctimas al detectar las pequeñas diferencias de temperatura entre el cuerpo de la presa y el entorno. Algunas especies de serpientes inmovilizan a la presa al inyectarle veneno que pasa a través de sus colmillos huecos. Las serpientes también cuentan con articulaciones en las mandíbulas que les permiten abrir éstas lo suficiente para engullir presas incluso más grandes que su cabeza.

Los caimanes y cocodrilos se han adaptado a la vida terrestre

Los crocodrílidos, como se conocen en conjunto las 21 especies de caimanes y cocodrilos, se encuentran en aguas costeras y de tierra adentro de las regiones más calientes de la Tierra. Están bien adaptados al modo de vida acuático, sus ojos y fosas nasales están situados sobre la cabeza de forma que pueden permanecer sumergidos durante mucho tiempo mientras la porción más alta de la cabeza sobresale de la superficie del agua. Los crocodrílidos cuentan con fuertes mandíbulas y dientes de forma cónica que utilizan para triturar y matar peces, aves, mamíferos, tortugas y anfibios para alimentarse.

El cuidado paternal está muy arraigado en los crocodrílidos, ya que la hembra entierra los huevos en nidos de lodo. Los padres vigilan el nido hasta que las crías rompen el cascarón, y la madre las coloca en su boca hasta dejarlas en un lugar seguro dentro del agua. Las crías permanecen con la madre durante varios años.

Las tortugas cuentan con un caparazón protector

Las 240 especies de tortugas ocupan una diversidad de entornos, incluidos desiertos, arroyos, estanques y océanos. Esta variedad de hábitat ha impulsado una diversidad de adaptaciones; pero todas las tortugas están protegidas por medio de un caparazón duro que está fusionado con las vértebras, costillas y clavículas. Las tortugas carecen de dientes, pero en su lugar han desarrollado un pico córneo. Este pico lo utilizan para comer una variedad de alimentos; algunas tortugas son carnívoras, otras son herbívoras y otras más son carroñeras. La tortuga más grande, la tortuga gigante, habita en los océanos y puede crecer hasta alcanzar 2 metros o más de longitud; se alimenta principalmente de medusas. Las tortugas gigantes y otras tortugas marinas regresan a tierra firme para desovar y a menudo recorren distancias extraordinariamente largas para llegar a las playas donde entierran los huevos en la arena.

a)

b)

c)

FIGURA 24-11 Diversidad de las aves
a) El delicado colibrí bate sus alas aproximadamente 60 veces por segundo y pesa alrededor de 4 gramos. ***b)*** Este joven pájaro fragata, que se alimenta de peces y habita en las islas Galápagos, ya casi no cabe en su nido. ***c)*** El avestruz es el ave más grande de todas y pesa más de 136 kilogramos; sus huevos pesan más de 1.5 kilogramos. PREGUNTA: Aunque el ancestro de todas las aves podía volar, muchas especies de aves, como el avestruz, no pueden. ¿Por qué supones que la incapacidad de volar ha evolucionado de forma repetida entre las aves?

Las aves son reptiles con plumaje

Un grupo muy característico de reptiles es el de las aves (**FIGURA 24-11**). Aunque las 9600 especies de aves tradicionalmente se han clasificado como un grupo aparte de los reptiles, los biólogos han demostrado que las aves son en realidad un subconjunto de un grupo evolutivo que incluye tanto a las aves como los grupos que comúnmente se han designado como reptiles (véase la página 361 del capítulo 18 para una información más completa). Las primeras aves aparecieron en el registro fósil hace cerca de 150 millones de años (**FIGURA 24-12**

alta que la ambiental, es característica tanto de las aves como de los mamíferos, animales a los que se suele describir como de sangre caliente o endotérmicos. En contraste, la temperatura corporal de los invertebrados, peces, anfibios y reptiles fluctúa con la temperatura ambiental, aunque estos animales ejercen cierto control sobre su temperatura corporal por medio de su comportamiento (por ejemplo, tomando el sol o buscando la sombra).

Los animales de sangre caliente como las aves tienen una alta tasa metabólica, la cual aumenta su demanda de energía y requiere de una eficiente oxigenación de los tejidos. Por consiguiente, las aves tienen que comer con frecuencia y poseen adaptaciones circulatorias y respiratorias que ayudan a satisfacer la necesidad de eficiencia. El corazón de las aves tiene cuatro cámaras, lo que evita que se mezcle la sangre oxigenada con la desoxigenada (los caimanes y cocodrilos también tienen un corazón de cuatro cámaras). El sistema respiratorio de las aves se complementa con sacos de aire que

FIGURA 24-12 El Archeopteryx, el "eslabón perdido" entre los reptiles y las aves
Un *Archeopteryx* se conserva en esta piedra caliza de 150 millones de años de antigüedad. Las plumas, una característica única de las aves, se distinguen con toda claridad; también es evidente que tuvo antepasados reptiles, pues al igual que los reptiles modernos (pero a diferencia de las aves actuales), el *Archeopteryx* tenía dientes, cola y garras.

aportan una dotación continua de aire oxigenado a los pulmones, aun cuando el ave exhala.

Los mamíferos producen leche para sus crías

Una rama del árbol evolutivo de los reptiles dio origen a un grupo que desarrolló pelo y divergió para constituir los mamíferos (clase Mammalia). Los mamíferos aparecieron por primera vez hace aproximadamente 250 millones de años, pero no se diversificaron ni llegaron a predominar en la Tierra sino hasta que se extinguieron los dinosaurios hace cerca de 65 millones de años. En la mayoría de los mamíferos, el pelaje protege y aísla al cuerpo caliente. Al igual que las aves, caimanes y cocodrilos, los mamíferos tienen un corazón de cuatro cámaras que incrementa la cantidad de oxígeno que llega a los tejidos. Como sus patas fueron diseñadas para correr y no para reptar, los mamíferos son veloces y ágiles.

Los mamíferos se llaman así porque producen leche por medio de las **glándulas mamarias** que utilizan todas las hembras de esta clase para amamantar a sus crías. Además de estas glándulas únicas, el cuerpo de los mamíferos tiene glándulas sudoríparas, odoríferas y sebáceas (que producen aceite), ninguna de las cuales se encuentra en otros vertebrados. El sistema nervioso de los mamíferos ha contribuido de manera significativa a su éxito al hacer posible su adaptación conductual a los cambios ambientales. El cerebro está más desarrollado que el de cualquier otro grupo de vertebrados, lo que confiere a los mamíferos curiosidad y facilidad para el aprendizaje inigualables. Su cerebro tan desarrollado permite a los mamíferos alterar su comportamiento con base en la experiencia, lo que les ayuda a sobrevivir en un entorno cambiante. Los periodos relativamente largos de cuidado paternal después del nacimiento permiten a algunos mamíferos aprender bastante bajo la guía de los progenitores. Los seres humanos y otros primates son buenos ejemplos de ello. De hecho, el cerebro grande del ser humano ha sido el factor principal que lo ha conducido al dominio del planeta Tierra.

Las 4600 especies de mamíferos incluyen tres linajes evolutivos: monotremas, marsupiales y mamíferos placentarios.

Los monotremas son mamíferos que ponen huevos

A diferencia de otros mamíferos, los **monotremas** ponen huevos en vez de dar a luz a crías vivas. Este grupo incluye sólo tres especies: el ornitorrinco y dos especies de animales con púas que se alimentan de hormigas, conocidos también como equidnas (**FIGURA 24-13**). Los monotremas se encuentran sólo en Australia (el ornitorrinco y el equidna de nariz corta) y en Nueva Guinea (el equidna de nariz larga).

Los equidnas son terrestres y se alimentan de insectos o lombrices que encuentran al escarbar la tierra. Los ornitorrincos buscan alimento en el agua y se sumergen en ella para atrapar pequeños vertebrados e invertebrados. El cuerpo del ornitorrinco está bien adaptado a este modo de vida acuático: tiene una forma hidrodinámica, patas membranosas, una cola ancha y un hocico carnoso como de pato que le sirve para localizar el alimento.

Los huevos de los monotremas tienen cascarón con aspecto parecido al del cuero; la madre los incuba de 10 a 12 días. Los equidnas tienen una bolsa especial para incubar los huevos, pero los huevos del ornitorrinco se incuban entre la cola de la madre y su abdomen. Los monotremas recién nacidos son pequeños e indefensos y se alimentan de la leche que secreta la madre. Sin embargo, los monotremas carecen de pezones. La leche que producen las glándulas mamarias escurre de los conductos del abdomen de la madre y moja la piel que está alrededor de ellos; entonces las crías lamen la leche.

La diversidad de los marsupiales alcanza su punto máximo en Australia

En todos los mamíferos, excepto en los monotremas, los embriones se desarrollan en el útero, un órgano muscular que está en el aparato reproductor femenino. El revestimiento del útero se combina con las membranas derivadas del embrión

a)

b)

FIGURA 24-13 Monotremas

Los monotremas, como este ornitorrinco, ponen huevos coriáceos (es decir, con aspecto de cuero) parecidos a los de los reptiles. Los ornitorrincos viven en madrigueras que excavan a orillas de los ríos, lagos o arroyos. ***b)*** Las cortas extremidades y gruesas garras de los equidnas les ayudan a desenterrar insectos y lombrices con los que se alimentan. Las duras espinas que cubren el cuerpo de estos animales son en realidad pelaje modificado.

a)

b)

c)

FIGURA 24-14 Marsupiales

a) Los marsupiales, como el wallaby, dan a luz a crías extremadamente inmaduras, que inmediatamente se sujetan a un pezón y se desarrollan dentro de la bolsa protectora de la madre (imagen en recuadro). ***b)*** El oso australiano o wombat es un marsupial que vive en su madriguera; su bolsa se abre hacia la parte posterior del cuerpo para evitar que entre el polvo y los desechos al estar cavando el túnel de la madriguera. Uno de los depredadores del oso australiano es ***c)*** el diablo de Tasmania, el marsupial carnívoro más grande.

para formar la **placenta**, una estructura que permite el intercambio de gases, nutrimentos y desechos entre los sistemas circulatorios de la madre y del embrión.

En los **marsupiales**, el embrión se desarrolla en el útero, pero sólo durante un breve periodo. Las crías de marsupiales nacen en una etapa inmadura de desarrollo. Inmediatamente después del nacimiento, reptan hacia un pezón, lo sujetan firmemente y se nutren de la leche para completar su desarrollo. En la mayoría de las especies de marsupiales, pero no en todas, el desarrollo después del nacimiento tiene lugar dentro de una bolsa protectora.

Solamente una especie de marsupiales, la zarigüeya de Virginia, es nativa de Norteamérica. La mayoría de las 275 especies de marsupiales se encuentran en Australia, donde los marsupiales, como los canguros, han llegado a ser el emblema de esta isla continente. Los canguros son los marsupiales más grandes y llamativos de Australia; la especie más grande, el canguro rojo, puede alcanzar una altura de 2.10 metros y es capaz de dar saltos de 9 metros de longitud cuando se desplaza con máxima rapidez. Aunque los canguros son quizá los marsupiales más conocidos, el grupo abarca especies con una gama de tamaños, formas y modos de vida, incluidos el koala, el oso australiano y el diablo de Tasmania (**FIGURA 24-14**).

Los mamíferos placentarios habitan en tierra, aire y mar

La mayoría de las especies de mamíferos son **placentarias** que los mamíferos se han propagado por casi todos los hábitat y de que sus cuerpos se han adaptado perfectamente a diversos modos de vida (**FIGURA 24-15**

a)

b)

c)

d)

FIGURA 24-15 Diversidad de los mamíferos placentarios
a) Esta ballena jorobada le da un impulso a su cría. ***b)*** Un murciélago, el único mamífero capaz de volar, se orienta de noche mediante una especie de sonar. Sus largas orejas le ayudan a percibir los ecos de sus agudos chillidos que rebotan en los objetos cercanos. ***c)*** Los mamíferos deben su nombre a las glándulas mamarias con las que las hembras amamantan a sus crías, como esta madre guepardo. ***d)*** El orangután macho puede llegar a pesar hasta 75 kilogramos. Estos simios inteligentes y agradables habitan en los bosques pantanosos de ciertas regiones del trópico y están en peligro de extinción, debido a la caza de que son objeto y a la destrucción de su hábitat.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

¿Los seres humanos son un éxito biológico?

ENLACES CON LA VIDA ¿Los animales pertenecen a los laboratorios?

Los animales vertebrados están sometidos a muchas investigaciones en los laboratorios, en parte porque los biólogos, al igual que la mayoría de la gente, tienden a interesarse más en los vertebrados que en otros tipos de organismos. Sin embargo, el empleo de vertebrados en las investigaciones surge de su parecido con los seres humanos. A menudo los investigadores esperan responder a preguntas acerca de la biología humana y emplean la información obtenida por medio de la experimentación en ratas, ratones, perros, monos y otros vertebrados (**FIGURA E24-2**). Muchos de estos experimentos podrían considerarse como faltos de ética si se hicieran con seres humanos. Por ejemplo, no es permisible exponer a los humanos de manera intencional a microorganismos causantes de enfermedades, ni tampoco inyectarles fármacos que no han sido probados aún, ni experimentar nuevas técnicas quirúrgicas en personas sanas, o matar intencionalmente a alguien con fines de investigación. No obstante, tales manipulaciones se realizan de forma rutinaria con los animales de laboratorio.

Algunos observadores y activistas argumentan que los animales tienen derecho a que se les proteja contra el dolor causado por las investigaciones científicas. Desde este punto de vista, los humanos no tienen derecho a someter a los miembros de otras especies a tratamientos que serían poco éticos si se aplicaran a personas, por lo que no se justifica el dolor que se provoca a los animales en los experimentos. Muchos científicos, sin embargo, objetan con insistencia la afirmación de que la investigación en animales es poco ética, argumentando que el progreso del conocimiento científico, incluidos los tratamientos que salvan vidas humanas, requiere de las investigaciones utilizando animales vertebrados.

¿Qué piensas acerca de esto? ¿Es siempre poco ético que se hagan investigaciones científicas utilizando animales? ¿O es aceptable en algunos tipos de investigación e inaceptable en otros? ¿O estás satisfecho con el sistema actual en que los científicos tienen toda la libertad para emplear animales en sus investigaciones, y en el que los animales están protegidos por reglamentaciones que limitan su sufrimiento?

FIGURA E24-2 Las ratas son los vertebrados que más se utilizan en los laboratorios dedicados a la investigación

actividades han alterado el entorno de formas que son hostiles para la vida, incluida la nuestra. El ácido producido por las plantas generadoras de electricidad y por los automóviles se precipita sobre la tierra en forma de lluvia, la cual es una amenaza para nuestros bosques y lagos, además de erosionar el mármol del Partenón. Cada día se extienden más los desiertos a medida que se expande el pastoreo excesivo y se talan bosques. Nuestras tendencias agresivas, acicateadas por las presiones de deseos y necesidades, y magnificadas por el poder de nuestra tecnología, nos han capacitado para destruirnos a nosotros mismos junto con casi todas las demás formas de vida.

La mente humana es la fuente de nuestros problemas más urgentes y también nuestra mayor esperanza de resolverlos. ¿Dedicaremos nuestro potencial mental para mitigar las consecuencias de nuestros actos, controlar nuestras poblaciones y preservar los ecosistemas que son el sustento de nuestras vidas y de otras formas de vida? ¿Somos un fenomenal éxito biológico, o una brillante catástrofe? Quizás los próximos siglos nos darán la respuesta.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO HISTORIA DE PECES

Después de que Marjorie Courtney-Latimer descubrió el celacanto, J. L. B. Smith se dio a la tarea de buscar más ejemplares en las aguas de Sudamérica. No encontró ninguno, sino hasta 1952, cuando unos pescadores de la isla Comoros, al leer los volantes que ofrecían una recompensa a quien encontrara un celacanto, se pusieron en contacto con Smith para darle la noticia de que tenían un ejemplar. Smith voló de inmediato a Comoros, y se sabe que lloró de alegría cuando tomó entre sus manos el ejemplar de celacanto que pesaba casi 40 kilogramos, que lo estaba esperando.

Desde entonces, los pescadores han atrapado cerca de 200 celacantos, en su mayoría en aguas de la isla Comoros, y también alrededor del cercano Madagascar y frente a las costas de Mozambique y Sudáfrica. Los científicos pensaban que el hábitat de este pez estaba restringido a una zona relativamente pequeña del Océano Índico occidental, por lo que se generó un verdadero revuelo cuando algunos ejemplares se descubrieron en Indonesia, a una distancia de 9600 kilómetros. Las pruebas de DNA mostraron que estos celacantos indonesios eran miembros de una segunda especie.

Aunque los especímenes de celacantos han revelado bastante información acerca de su anatomía, sus hábitat y comportamiento todavía permanecen en el misterio. Las observaciones de las investigaciones submarinas sugieren que los celacantos pasan mucho tiempo metidos en cuevas y debajo de formaciones rocosas a profundidades de entre 100 y 400 metros. La localización por radio sugiere que pueden aventurarse a salir a mar abierto por las noches, probablemente en busca de alimento. Casi todos los ejemplares observados (o atrapados) miden cuando menos 90 cm de longitud, lo cual sugiere que las crías deben viajar a lugares muy retirados de las poblaciones principales de adultos para poder madurar, aunque todavía no se ha descubierto cuáles son esos lugares.

Las poblaciones conocidas de celacantos son pequeñas y consisten en unos cuantos cientos de individuos; parece que esta cifra se está reduciendo. Parte de esta reducción se debe a la pesca, aunque los pescadores los atrapan casi siempre por mero accidente al buscar especies de mayor aceptación comercial. Los esfuerzos de conservación desplegados en Sudáfrica y en Comoros se enfocan principalmente a introducir métodos de pesca que reduzcan las probabilidades de capturar celacantos por accidente.

Piensa en esto Muchos relatos relacionados con los celacantos se refieren a ellos como "fósiles vivientes", un término que se aplica también a los caimanes, los árboles ginkgo, los cangrejos bayoneta y otras especies cuya apariencia moderna es semejante a la de los fósiles. Esta designación de fósiles vivientes significa que estos organismos han evolucionado muy poco durante un periodo muy largo. ¿Piensas que esto es una afirmación precisa? ¿Es correcto decir que los "fósiles vivientes" han evolucionado más lentamente o han sufrido menos cambios evolutivos que otras especies?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

24.1 ¿Cuáles son las características distintivas de los cordados?

El filum Chordata incluye dos grupos de invertebrados, los anfioxos y los tunicados, así como los vertebrados. Todos los cordados poseen un notocordio, un cordón nervioso dorsal hueco, hendiduras branquiales faríngeas y una cola post-anal en alguna etapa de su desarrollo. Los vertebrados son un subfilum de cordados y tienen espina dorsal, la cual es parte de su endoesqueleto vivo.

Web tutorial 24.1 Cordados

24.2 ¿Cuáles son los principales grupos de vertebrados?

Los mixinos son cordados en forma de anguila, que carecen de mandíbulas y de una espina dorsal verdadera y, por lo tanto, no son verdaderos vertebrados. Las lampreas son vertebrados sin mandíbulas; las especies de lampreas más conocidas son parásitos de los peces.

Todos los anfibios tienen patas, y la mayoría tiene pulmones sencillos para respirar en el aire y no en el agua. La mayoría de ellos están confinados a hábitat terrestres relativamente húmedos debido a su necesidad de conservar húmeda su piel, a que su fecundación es externa, y a que sus huevos y larvas se desarrollan en el agua.

Los reptiles tienen pulmones bien desarrollados, su piel es seca y está recubierta de escamas relativamente impermeables, su fecundación es interna, y sus huevos amnióticos tienen su propia dotación de agua. Los reptiles están bien adaptados a los hábitat terrestres más secos.

Las aves también son totalmente terrestres y presentan adaptaciones adicionales que les permiten que los músculos respondan con rapidez independientemente de la temperatura ambiental, como una temperatura corporal elevada. El cuerpo de las aves está diseñado para volar, ya que tienen plumaje, huesos huecos y sistemas circulatorio y respiratorio eficientes, así como un sentido de la vista muy desarrollado.

Los mamíferos tienen pelaje aislante y dan a luz a crías vivas que se alimentan con leche materna. El sistema nervioso de los mamíferos es el más complejo del reino animal, lo que los capacita para aprender mejor y adaptarse a los cambios ambientales.

TÉRMINOS CLAVE

amnios *pág.* 478
cartílago *pág.* 471
cola post-anal *pág.* 471
columna vertebral *pág.* 471
cordón nervioso *pág.* 470
glándula mamaria *pág.* 480
hendidura branquial faríngea *pág.* 471
huevo amniótico *pág.* 478
marsupial *pág.* 480
monotrema *pág.* 480
notocordio *pág.* 471
placenta *pág.* 481
placentario *pág.* 481
vertebrado *pág.* 470

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Describe brevemente cada una de las siguientes adaptaciones y explica el significado de cada una: columna vertebral, mandíbulas, extremidades, huevo amniótico, plumas, placenta.
2. Lista los grupos de vertebrados que presenten las siguientes características:
   a) Un esqueleto de cartílago
   b) Un corazón de dos cámaras
   c) Un huevo amniótico
   d) Sangre caliente
   e) Un corazón de cuatro cámaras
   f) Una placenta
   g) Pulmones con sacos de aire
3. Lista cuatro características específicas de los cordados.
4. Describe las formas en que los anfibios se adaptan a la vida terrestre. ¿En qué formas todavía están restringidos los anfibios a un ambiente acuoso o húmedo?
5. Lista las adaptaciones que diferencian a los reptiles de los anfibios y que ayudan a los reptiles a adaptarse a la vida en ambientes terrestres secos.
6. Lista las adaptaciones de las aves que contribuyen a su capacidad para volar.
7. ¿En qué difieren los mamíferos de las aves y qué adaptaciones comparten?
8. ¿Cómo ha contribuido el sistema nervioso de los mamíferos a su éxito?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Los mixinos son vertebrados o invertebrados? ¿En qué características te basaste para contestar esta pregunta? ¿Es importante que seas capaz de ubicarlos en una categoría u otra? ¿Por qué?
2. ¿La disminución de las poblaciones de anfibios debe preocupar a los seres humanos? ¿Y el incremento de las deformidades en las ranas? ¿Por qué es importante comprender las causas de estos fenómenos?
3. Explica los atributos que utilizarías para defender el éxito biológico entre los animales. ¿Los seres humanos son un éxito biológico según estas pautas? ¿Por qué?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Attenborough, David. *The Life of Birds*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998. Una investigación a fondo de las adaptaciones de las aves; incluye hermosas fotografías.

Attenborough, David. *The Life of Mammals.* Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002. Un estudio sobre los mamíferos y cómo viven, con bellas fotografías.

Blaustein, A. R. "Amphibians in a Bad Light". *Natural History*, octubre de 1994. Disminuciones recientes en las poblaciones y diversidad de los anfibios están vinculadas con posibles daños por la luz ultravioleta que está penetrando por la deteriorada capa de ozono.

Blaustein, A. y Johnson, P. T. J. "Explaining Frog Deformities". *Scientific American*, febrero de 2003. Los incrementos drásticos en las deformaciones de las ranas son causados por una epidemia parasitaria exacerbada por la degradación ambiental.

Duellman, W. E. "Reproductive Strategies of Frogs". *Scientific American*, julio de 1992. Los renacuajos que viven libremente son sólo una forma en la que estos anfibios crecen desde que salen del huevo hasta alcanzar la adultez.

Pauly, D. y Watson, R. "Counting the Last Fish". *Scientific American*, julio de 2003. Un resumen de la evidencia de que las poblaciones de peces están sufriendo una disminución catastrófica y un análisis sobre lo que se debería hacer.

Perkins, S. "The Last Pisces of an Evolutionary Puzzle". *Science News*, 5 de mayo de 2001. Un resumen de las investigaciones recientes sobre los celacantos y su hábitat natural.

Raloff, J. "Empty Nets". *Science News*, 4 de junio de 2005. Una actualización sobre cómo la pesca excesiva realizada por el hombre amenaza las poblaciones de peces cartilaginosos y óseos.

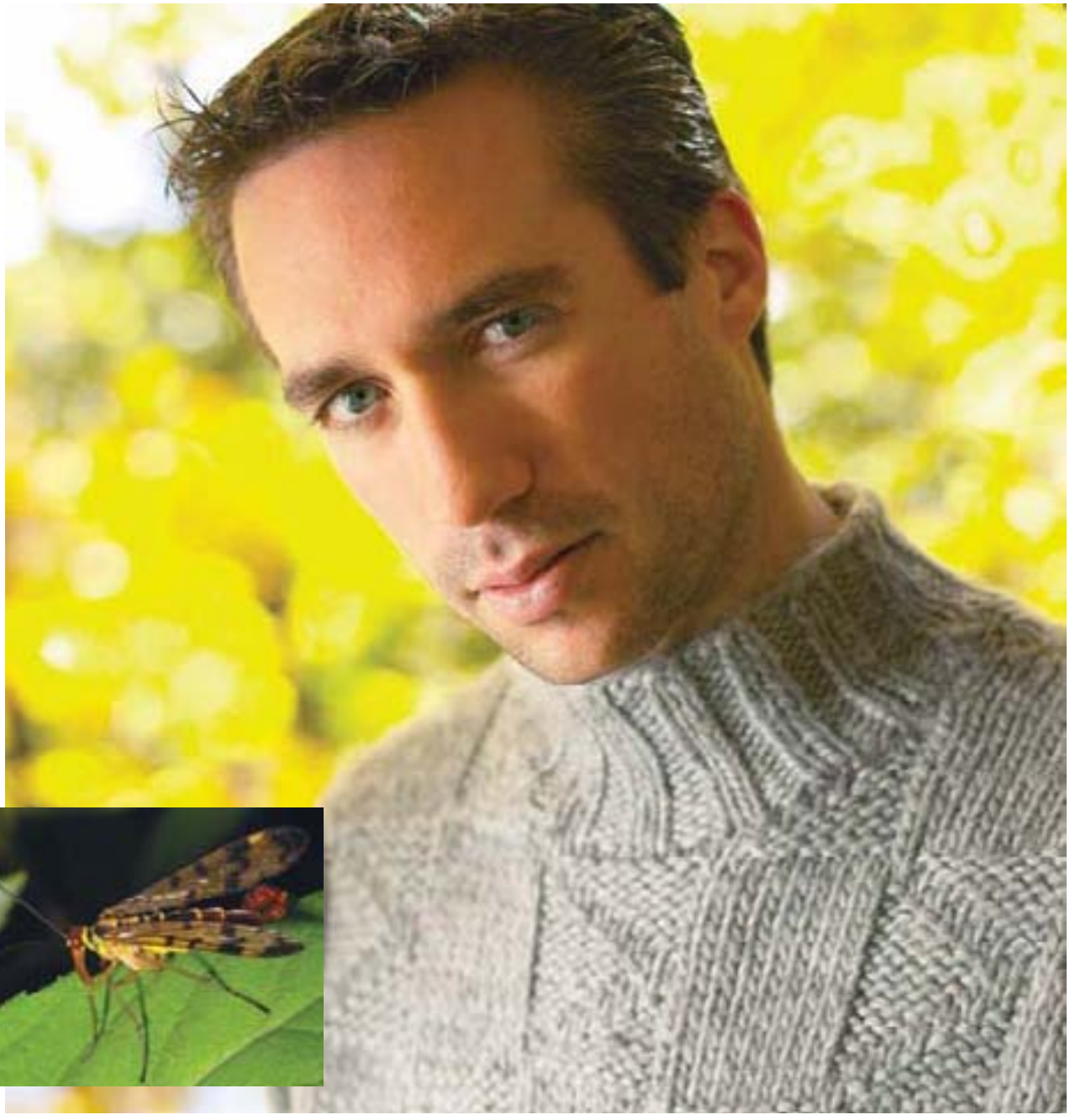
UNIDAD 4

Comportamiento y ecología

La belleza y la interdependencia de la biosfera de la Tierra se ilustran en "El paraíso", la primera parte de *La trilogía de la Tierra*, por Suzanne Duranceau/Illustratice, Inc.

CAPÍTULO 25

Comportamiento animal



Tanto esta mosca escorpión macho como este hombre son excepcionalmente atractivos para las hembras de sus especies. El secreto de su atractivo físico es que ambos tienen un cuerpo sumamente simétrico.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Sexo y simetría

25.1 ¿En qué difieren los comportamientos innatos y los aprendidos?
- Los comportamientos innatos no requieren experiencia previa
- Los comportamientos aprendidos se modifican con la experiencia
- No hay una distinción importante entre comportamientos innatos y aprendidos

25.2 ¿Cómo se comunican los animales?
- La comunicación visual es la más eficaz a distancias cortas
- La comunicación por sonido es eficaz a distancias más largas
- Los mensajes químicos persisten más tiempo y es difícil variarlos
- La comunicación por tacto ayuda a establecer vínculos sociales

25.3 ¿Cómo compiten los animales por recursos?
- Un comportamiento agresivo ayuda a obtener y conservar recursos
- Las jerarquías de dominancia ayudan a controlar las interacciones agresivas
- Los animales podrían defender territorios que contienen recursos

25.4 ¿Cómo encuentran pareja los animales?
- Las señales vocales y visuales codifican el sexo, la especie y la calidad individual

25.5 ¿Qué tipos de sociedades forman los animales?
- La vida en grupo tiene ventajas y desventajas
- El comportamiento social varía entre especies
- La formación de grupos con parientes fomenta el desarrollo del altruismo
- Las abejas viven juntas en sociedades de estructura rígida
- Las ratas topo desnudas forman una sociedad compleja de vertebrados

25.6 ¿La biología logra explicar el comportamiento humano?
- El comportamiento de los recién nacidos tiene un componente innato importante
- Los humanos adquieren el lenguaje fácilmente desde pequeños
- Los comportamientos comunes a culturas diversas podrían ser innatos
- Las personas podrían responder a feromonas
- Estudios con gemelos revelan los componentes genéticos del comportamiento
- La investigación biológica del comportamiento humano genera controversia

Conexiones evolutivas: ¿Por qué juegan los animales?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría

ESTUDIO DE CASO SEXO Y SIMETRÍA

¿QUÉ HACE QUE UN HOMBRE SEA ATRACTIVO? De acuerdo con un creciente número de investigaciones, su simetría. La preferencia sexual de las hembras por machos con cuerpos simétricos se documentó por primera vez en los insectos. Por ejemplo, el biólogo Randy Thornhill encontró que la simetría predice de manera bastante precisa el éxito de apareamiento de las moscas escorpión japonesas macho. En los experimentos y las observaciones de Thornhill, los machos de mayor éxito fueron aquellos cuyas alas izquierda y derecha eran iguales o casi iguales en longitud. Los machos con un ala más larga que la otra tenían menos probabilidad de copular; cuanto mayor era la diferencia entre las dos alas, menor era la probabilidad de éxito.

El trabajo de Thornhill con las moscas escorpión lo hizo preguntarse si los efectos de la simetría también se extenderían a los seres humanos. Para probar la hipótesis de que las mujeres encuentran más atractivos a los hombres más simétricos, Thornhill y sus colaboradores se dieron a la tarea de medir la simetría en adultos jóvenes. El grado de simetría de cada uno se evaluó tomando como base las medidas del largo de las orejas y el ancho de sus pies, tobillos, manos, muñecas, codos y orejas. A partir de estas mediciones, los investigadores obtuvieron un índice que resumía el grado en el que el tamaño de tales partes difería entre el lado izquierdo y el derecho del cuerpo.

Los investigadores reunieron después a un grupo de mujeres observadoras, quienes desconocían la naturaleza del estudio; les mostraron fotografías de los rostros de los hombres sometidos a medición. Como predecía la hipótesis de los investigadores, las mujeres consideraron que los hombres más simétricos eran los más atractivos. Una encuesta con los mismos sujetos del estudio reveló que los hombres más simétricos también tienden a iniciar su vida sexual antes que los demás y tienen más parejas sexuales que el resto. Aparentemente, la actividad sexual y el atractivo de un hombre se correlacionan con la simetría de su cuerpo.

¿Por qué las mujeres prefieren a los hombres simétricos? Considera esta pregunta conforme lees acerca del comportamiento animal.

25.1 ¿EN QUÉ DIFIEREN LOS COMPORTAMIENTOS INNATOS Y LOS APRENDIDOS?

Un **comportamiento** es cualquier actividad observable de un animal vivo. Por ejemplo, una polilla vuela hacia la luz brillante, una abeja vuela hacia una taza de agua azucarada y una mosca doméstica vuela hacia un trozo de carne en descomposición. Los azulejos cantan, los lobos aúllan y las ranas croan. Las cabras de la montaña hacen chocar sus cabezas en el ritual del combate; los chimpancés se acicalan unos a otros; las hormigas atacan a una termita que se acerca al hormiguero. Los seres humanos fuman, juegan tenis y cuidan de sus jardines. Incluso el observador más casual ve muchos ejemplos de comportamiento animal cada día y un agudo observador encuentra un número ilimitado de comportamientos fascinantes.

Los comportamientos innatos no requieren experiencia previa

Los comportamientos **innatos** se efectúan de manera razonablemente completa incluso la primera vez que un animal de la edad correcta en el estado de motivación apropiado se encuentra con un estímulo particular. (Por ejemplo, el estado de motivación apropiado para alimentarse sería tener hambre). Los científicos pueden demostrar que un comportamiento es innato privando al animal de la oportunidad de aprenderlo. Por ejemplo, las ardillas rojas silvestres entierran nueces en otoño y las buscan durante el invierno. Es posible criar ardillas rojas, desde que nacen, en una jaula simple con una dieta líquida, de forma que no tengan ninguna experiencia con las nueces ni con las actividades de escarbar o enterrar. Si presentamos nueces por primera vez a una ardilla en tales condiciones, ésta llevará una nuez a la esquina de su jaula y realizará movimientos de cubrirla y aplanarla con sus patas delanteras. Es evidente que el comportamiento de enterrar nueces es innato.

También podemos reconocer los comportamientos innatos si se presentan de inmediato después del nacimiento, antes de que haya oportunidad de aprenderlos. El cuclillo, por ejemplo, pone sus huevos en el nido de otra especie de pájaros para que éstos se conviertan, sin darse cuenta, en sus padres adoptivos. Inmediatamente después de que el huevo se rompe, el polluelo del cuclillo empuja del nido los huevos (o los polluelos) del dueño del nido, para así eliminar a quienes competirían con él por alimento (**FIGURA 25-1**).

Los comportamientos aprendidos se modifican con la experiencia

La selección natural podría favorecer los comportamientos innatos en muchas circunstancias. Por ejemplo, para el polluelo de una gaviota argéntea obviamente es ventajoso picotear el pico de su progenitor tan pronto como nace, porque este comportamiento estimula al progenitor para que lo alimente. No obstante, en otras circunstancias, los patrones de comportamiento rígidos serían menos útiles. Por ejemplo, si a un mirlo de alas rojas macho se le coloca cerca de una hembra disecada, intentará copular con ella, un comportamiento que obviamente no producirá prole. En muchas situaciones, un mayor grado de flexibilidad en el comportamiento resulta ventajoso.

La capacidad para efectuar cambios en el comportamiento, con base en la experiencia, se denomina **aprendizaje**. Tal definición aparentemente sencilla abarca una gama enorme de fenómenos. Un sapo aprende a evitar insectos con sabor desagradable, una musaraña recién nacida aprende a distinguir a su madre entre otros adultos, un ser humano aprende a hablar un idioma, y un gorrión aprende a usar las estrellas para orientarse. Cada uno de los numerosos ejemplos de aprendizaje animal representa el resultado de una historia evolutiva singular, de manera que los procesos de aprendizaje son tan diversos como los animales mismos. No obstante, resulta útil clasificar los tipos de aprendizaje, siempre y cuan-

FIGURA 25-1 Comportamiento innato
a) El polluelo del cuclillo, apenas horas después de salir del huevo y antes de abrir los ojos, desaloja del nido los huevos de sus padres adoptivos. ***b)*** Los progenitores, ante el estímulo del pico completamente abierto del polluelo de cuclillo, lo alimentan sin darse cuenta de que no es hijo suyo. PREGUNTA: El polluelo del cuclillo se beneficia de este comportamiento innato, pero el padre adoptivo resulta perjudicado con su respuesta innata a la demanda del polluelo. ¿Por qué la selección natural no ha eliminado este comportamiento innato desventajoso?

do tengamos presente que las categorías no son más que guías generales y que muchos ejemplos de aprendizaje no pertenecen claramente a ninguna categoría.

La habituación es una disminución en la respuesta a un estímulo repetido

Una forma común de aprendizaje simple es la **habituación**, que se define como una disminución en la respuesta a un estímulo repetido. La capacidad para habituarse evita que un animal derroche su energía y su atención en estímulos sin importancia. Esta forma de aprendizaje se observa incluso en los animales más simples. Por ejemplo, una anémona de mar retrae sus tentáculos cuando se le toca, pero gradualmente deja de retraerlos si se le toca de manera continua (FIGURA 25-2).

Es obvio que la capacidad para habituarse es adaptativa. Si una anémona de mar se replegara cada vez que la roza un filamento de un alga marina que ondea en las aguas, el animal desperdiciaría gran cantidad de energía y su postura retraída le impediría atrapar alimento. El ser humano se habitúa a muchos estímulos: quienes viven en ciudades se acostumbran al ruido del tráfico nocturno, y quienes viven en el campo, al coro de grillos y ranas arborícolas. Es posible que al principio ambos encuentren el hábitat del otro insoportablemente ruidoso, pero se acostumbrarán con el tiempo.

El condicionamiento es una asociación aprendida entre un estímulo y una respuesta

Una forma más compleja de aprendizaje es el **aprendizaje por ensayo y error**, en el que los animales adquieren nuevas respuestas apropiadas a los estímulos a través de la experiencia. Muchos animales enfrentan recompensas y castigos naturales; además, pueden aprender a modificar sus respuestas a los mismos. Por ejemplo, un sapo hambriento que captura una abeja pronto aprende a evitar encuentros futuros con las abejas (FIGURA 25-3). Basta una experiencia con el aguijón de la abeja en la lengua para que el sapo modifique su respuesta a los insectos voladores con la finalidad de excluir a las abejas (e incluso a otros insectos parecidos a ellas).

El aprendizaje por ensayo y error es un aspecto importante del desarrollo del comportamiento en muchas especies animales, y a menudo se presenta durante el juego y el comportamiento de exploración (véase la sección "Conexiones evolutivas: ¿Por qué juegan los animales?"). Este tipo de aprendizaje desempeña un papel clave en el comportamiento humano; por ejemplo, permite a un niño aprender que algunos alimentos saben bien o mal, que una estufa está caliente y que no debe tirar de la cola de un gato.

Una técnica de laboratorio llamada **condicionamiento operante** ha revelado algunas propiedades interesantes del aprendizaje por ensayo y error. Durante el condicionamiento operante, el animal aprende a realizar un comportamiento (como empujar una palanca o picotear un botón) para recibir una recompensa o evitar un castigo. Esta técnica se asocia principalmente con el psicólogo comparativo estadounidense B. F. Skinner, quien diseñó la "caja de Skinner", en la que se aísla a un animal y se le permite adiestrarse a sí mismo. La caja podría contener una palanca que, al presionarse, expulsa una bolita de alimento. Si el animal empuja accidentalmente la palanca, aparecerá alimento como recompensa. Después de repetirse varias veces tal suceso, el animal aprende el vínculo entre la acción de oprimir la palanca y recibir alimento, por lo que pronto comienza a presionar la palanca una y otra vez.

Se ha utilizado condicionamiento operante para adiestrar animales e inducirlos a que realicen tareas mucho más complejas que oprimir una palanca, pero quizá la revelación más interesante de esta técnica ha sido que las especies difieren en su propensión a aprender asociaciones específicas. En particular, las especies parecen estar predispuestas a aprender comportamientos que son pertinentes para sus necesidades. Por ejemplo, si se da a una rata un alimento con sabor distintivo al que se ha añadido una sustancia que hace que el animal enferme, aprenderá a evitar ese alimento en el futuro. En contraste, es muy difícil adiestrar a una rata para que se yerga sobre sus patas traseras como respuesta a una señal auditiva o visual dada. La diferencia puede explicarse preguntando cuál tarea de aprendizaje tiene mayor probabilidad de beneficiar a una rata de Noruega silvestre (la especie de la que

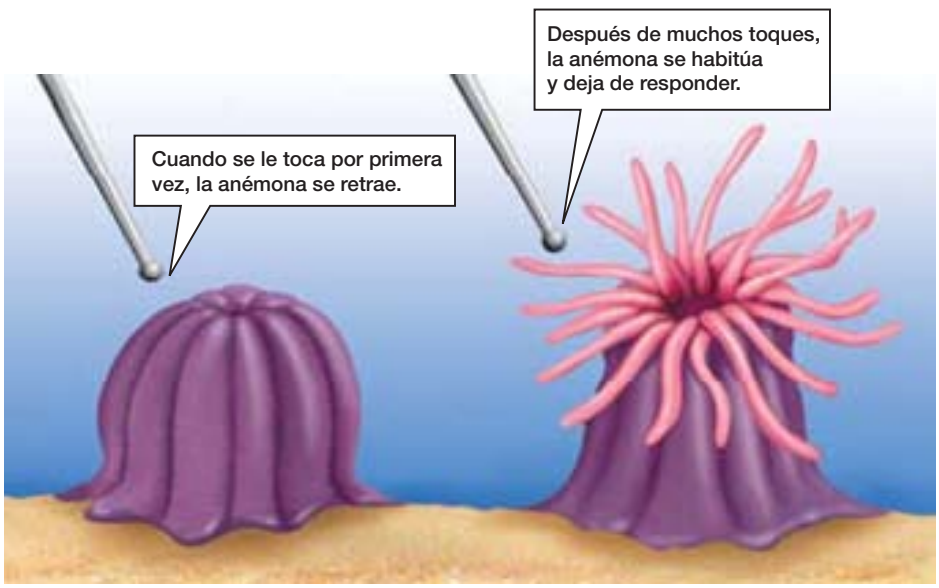
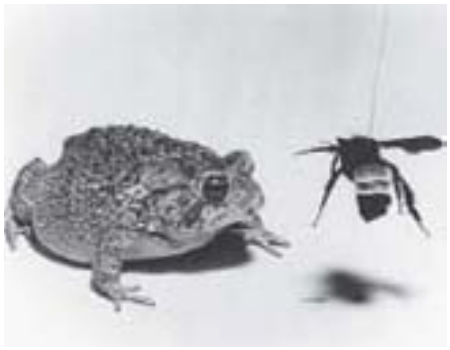


FIGURA 25-2 Habituación en una anémona de mar

a) Se presenta una abeja a un sapo sin experiencia.

b) Al tratar de comerse a la abeja, el sapo sufre una dolorosa picadura en la lengua.



c) Cuando se le presenta una mosca ladrona inocua, parecida a una abeja, el sapo se encoge.

d) Se presenta una libélula al sapo.

e) El sapo se come de inmediato la libélula y demuestra que la aversión aprendida es específica para las abejas y los insectos parecidos a ellas.

FIGURA 25-3 Aprendizaje por ensayo y error en un sapo

descienden las ratas de laboratorio). Es evidente que la capacidad de evitar alimentos que inducen malestar es benéfica para un animal como la rata de Noruega, que come una variedad enorme de alimentos. En cambio, aprender a erguirse como respuesta a un ruido no tiene ninguna ventaja obvia. En general, cabe esperar que las capacidades de aprendizaje particulares de cada especie hayan evolucionado para apoyar su respectivo modo de vida.

El discernimiento es resolución de problemas sin ensayo y error

En ciertas situaciones, los animales parecen capaces de resolver problemas repentinamente, sin haber tenido una experiencia previa. Este tipo de resolución repentina de problemas se conoce como **aprendizaje por discernimiento** porque se asemeja, al menos superficialmente, al proceso por el cual el ser humano manipula conceptos mentalmente para llegar a una solución. Desde luego, no podemos saber a ciencia cierta si los animales no humanos experimentan estados mentales similares al resolver problemas.

En 1917 el estudioso del comportamiento animal Wolfgang Kohler demostró que un chimpancé hambriento, sin adiestramiento, era capaz de apilar cajas para alcanzar un plátano colgado del techo. En otros tiempos se creyó que este tipo de resolución mental de problemas se limitaba a las especies animales más inteligentes como los primates, pero después se descubrió que animales a los que se considera menos inteligentes también cuentan con capacidades similares. Por ejemplo, R. Epstein y sus colaboradores realizaron un experimento en el cual demostraron que las palomas eran capaces de aprender por discernimiento. En el experimento, primero se adiestró a palomas (cuyas alas se habían recortado para que no pudieran volar) para que realizaran dos tareas sin relación entre sí a cambio de recompensas de alimento. Las tareas consistían en empujar una caja pequeña por el piso de la jaula y picotear un pequeño plátano de plástico. Después se presentó a las aves adiestradas una situación novedosa: un plátano de plástico que colgaba, fuera de su alcance, del techo de una jaula, en la cual también había una caja pequeña. Muchas de las palomas empujaron la caja hasta colocarla bajo el plátano de plástico y treparon en la caja para picotear la fruta artificial. Al parecer, una paloma adiestrada para ejecutar los movimientos físicos necesarios puede resolver el problema del plátano colgado, igual que un chimpancé.

No hay una distinción importante entre comportamientos innatos y aprendidos

Aunque los términos "innato" y "aprendido" resultan útiles para describir y entender los comportamientos, estas palabras también podrían tentarnos a simplificar excesivamente nuestra perspectiva del comportamiento animal. En la práctica, ningún comportamiento es exclusivamente innato o aprendido; todos son una mezcla inseparable de los dos tipos.

Una conducta aparentemente innata se puede modificar con la experiencia

Los comportamientos que al parecer se realizan correctamente desde el primer intento, sin experiencia previa, se pueden modificar por medio de la experiencia. Por ejemplo, un polluelo de gaviota argéntea que recién salió del cascarón picotea la mancha roja en el pico de su progenitor (**FIGURA 25-4**). Éste es un comportamiento innato que hace que el progenitor regurgite alimento para que el polluelo coma. El biólogo Niko Tinbergen estudió esta conducta de picoteo y descubrió que la respuesta de picoteo de polluelos muy jóvenes se activaba por la forma larga y delgada, así como por el color rojo del pico del progenitor. De hecho, cuando Tinbergen presentó a los polluelos recién nacidos una varilla roja y delgada en la que se habían pintado franjas blancas, la picotearon con mayor frecuencia que a un pico verdadero. Sin embargo, después de unos cuantos días, los polluelos aprendieron más acerca del aspecto de sus progenitores y comenzaron a picotear con mayor frecuencia modelos que se parecían más a sus padres. Luego de una semana, las jóvenes gaviotas habían aprendido lo suficiente acerca del aspecto de sus progenitores como para preferir modelos de su propia especie a modelos de especies estrechamente emparentadas. Finalmente, los polluelos aprendieron a pedir alimento sólo a sus padres.

La habituación (disminución de la respuesta a un estímulo repetido) también puede afinar las respuestas innatas de un organismo a los estímulos ambientales. Por ejemplo, las aves jóvenes se agazapan cuando un halcón vuela sobre ellas, pero no hacen caso de aves inofensivas como los gansos. Los primeros observadores postularon que sólo la forma muy específica de las aves depredadoras provocaba el comportamiento de agazaparse. Con la ayuda de un ingenioso modelo (**FIGURA 25-5**), Niko Tinbergen y Konrad Lorenz (dos de los fundadores de la **etología**, el estudio del comportamiento animal) probaron tal hipótesis. Cuando el modelo se movía en una dirección, se parecía a un ganso y los polluelos no le prestaban atención. En cambio, cuando su movimiento se invertía, el modelo semejaba un halcón y provocaba el comportamiento de agazaparse. Investigaciones posteriores revelaron que los polluelos sin experiencia se agazapan instintivamente cuando *cualquier* objeto se mueve por encima de ellos. Con el tiempo, su respuesta se habitúa a los objetos que pasan por arriba sin hacer daño y con frecuencia, como hojas de árboles, pajarillos y gansos. Los depredadores son mucho menos comunes, y la forma novedosa de un halcón sigue provocando que el polluelo se agazape instintivamente. Así, el aprendizaje modifica la respuesta innata y la hace más ventajosa.

FIGURA 25-5 La habituación modifica respuestas innatas
Konrad Lorenz y su alumno Niko Tinbergen emplearon este modelo para investigar la respuesta de polluelos a la forma de los objetos que vuelan sobre ellos. La respuesta dependió de la dirección en la que se movía el modelo. Si se mueve hacia la derecha, el modelo semeja un halcón en busca de una presa, pero cuando se mueve hacia la izquierda semeja un inofensivo ganso.

FIGURA 25-4 La experiencia puede modificar comportamientos innatos
Un polluelo de gaviota argéntea picotea el pico de su madre para que ésta regurgite comida.

El aprendizaje podría regirse por restricciones innatas

El aprendizaje siempre se efectúa dentro de límites que ayudan a aumentar la probabilidad de que sólo se adquirirá el comportamiento apropiado. Por ejemplo, aunque los tordos jóvenes escuchan el canto de gorriones, currucas, pinzones y otras especies que anidan cerca, sólo aprenden el canto de los tordos adultos. La capacidad de los tordos para aprender a cantar se limita a los cantos de su propia especie, en tanto los cantos de otras especies quedan excluidos del proceso de aprendizaje.

Quizá la ilustración más impresionante de las restricciones innatas del aprendizaje es la **impronta** (o *imprinting*), una forma especial de aprendizaje en el que el sistema nervioso está rígidamente programado para aprender sólo durante cierto periodo de desarrollo. Esto provoca que se forme una fuerte asociación durante una etapa particular, llamada periodo sensible, de la vida del animal. Durante esa etapa, el animal está preparado para aprender un tipo específico de información, que después se incorpora en un comportamiento que las experiencias ulteriores no alteran fácilmente.

La impronta es muy común en aves como gansos, patos y pollos. Estas aves aprenden a seguir al animal u objeto que con mayor frecuencia encuentran durante un periodo sensible temprano. En la naturaleza, la madre es el objeto con mayor probabilidad de estar cerca durante el periodo sensible, así que las jóvenes aves realizan la impronta con ella. Sin embargo, en el laboratorio puede lograrse que tales aves formen la

FIGURA 25-6 Konrad Lorenz y la impronta
Konrad Lorenz, a quien se reconoce como "el padre de la etología", es seguido por gansos jóvenes que formaron la impronta con él poco después de nacer. Ahora lo siguen como seguirían a su madre.

impronta con un tren de juguete u otro objeto móvil (**FIGURA 25-6**), aunque si se les ofrece la opción, elegirán a un adulto de su especie.

Todos los comportamientos surgen de una interacción entre los genes y el entorno

FIGURA 25-7 Los genes influyen en el comportamiento migratorio
Las currucas de gorra negra de Europa occidental inician su migración otoñal volando en dirección suroeste, pero las de Europa oriental vuelan al sureste cuando inician su migración. Si se cruzan miembros de las dos poblaciones en cautiverio, la prole híbrida se orienta en una dirección intermedia entre las direcciones migratorias de los progenitores: directo hacia el sur. PREGUNTA: Si algunas jóvenes currucas de gorra negra de una población silvestre en Europa occidental se llevaran a Europa oriental y se criaran hasta la adultez en un ambiente normal, ¿en qué dirección esperarías que se orientaran?

El comportamiento migratorio de las aves tiene un componente heredado

Al final del verano, muchas aves desaparecen de los hábitat donde han pasado la época de apareamiento y se dirigen a un hogar invernal situado a cientos o incluso miles de kilómetros al sur. Muchas de las aves que inician la migración efectúan el recorrido por primera vez porque nacieron unos meses antes. Resulta asombroso que estas aves sin experiencia partan en el momento y la dirección correctos y encuentren el lugar adecuado para pasar el invierno, a pesar de que no puedan seguir a aves más experimentadas (que por lo regular parten unas cuantas semanas antes). De alguna manera, estas jóvenes aves logran ejecutar una tarea muy difícil la primera vez que la intentan. Parece ser que las aves nacen con la capacidad migratoria; debe de estar "en sus genes". Y, efectivamente, aves que nacen en un laboratorio y se crían aisladas en interiores, se orientan en la dirección migratoria correcta cuando llega el otoño, al parecer, sin necesidad de aprendizaje ni experiencia.

La conclusión de que las aves cuentan con una capacidad genéticamente controlada para migrar en la dirección correcta recibió apoyo adicional de los experimentos de hibridación con currucas de gorro negro. Esta especie se cría en Europa y emigra hacia África, pero las poblaciones de diferentes áreas siguen rutas distintas. Las currucas de Europa occidental viajan al suroeste para llegar a África, mientras que las de Europa oriental viajan al sureste (**FIGURA 25-7**). Si aves de las dos poblaciones se cruzan en cautiverio, la prole híbrida volará de acuerdo con una orientación migratoria directamente hacia el

FIGURA 25-8 Una señal visual activa
El lobo indica agresión bajando la cabeza, erizando el pelaje del cuello y el lomo, enfrentando a su oponente con una mirada directa y mostrando los colmillos. La intensidad de estas señales puede variar para comunicar diferentes niveles de agresión.

sur, intermedia entre las que siguen los dos progenitores. Este resultado sugiere que los padres tenían genes que influyen en la dirección migratoria y que los híbridos heredaron una mezcla de esos genes.

25.2 ¿CÓMO SE COMUNICAN LOS ANIMALES?

Es común que los animales compartan información. Los sonidos emitidos, los movimientos realizados y las sustancias secretadas por los animales pueden revelar su ubicación física, nivel de agresión y disposición para aparearse. Si esa información evoca una respuesta de otros individuos, y si esa respuesta tiende a beneficiar al que la envía y al que la recibe, entonces se forma un canal de comunicación. **Comunicación** se define como la producción de una señal por un organismo, la cual hace que otro organismo modifique su comportamiento de una forma que beneficia a uno de ellos o a ambos.

Aunque animales de diferentes especies pueden comunicarse (como cuando un gato, con la cola erguida y el pelo erizado, que ronronea de una manera particular hacia un perro que no conoce), casi siempre la comunicación se efectúa entre miembros de la misma especie. Las parejas en potencia deben comunicarse, al igual que los progenitores y su prole. La comunicación también se utiliza con frecuencia para ayudar a resolver los conflictos que surgen cuando los miembros de una especie compiten directamente por alimentos, espacio y parejas.

Los mecanismos por los que los animales se comunican son asombrosamente diversos y aprovechan todos los sentidos. En las secciones que siguen examinaremos la comunicación por medio de señales visuales, sonoras, químicas y el tacto.

La comunicación visual es la más eficaz a distancias cortas

Los animales con ojos bien desarrollados, desde insectos hasta mamíferos, utilizan señales visuales para comunicarse. Las

FIGURA 25-9 Una señal visual pasiva
Las coloreadas e hinchadas nalgas del mandril hembra sirven como señal visual pasiva de que es fértil y está lista para aparearse.

señales son *activas* cuando un movimiento (como mostrar los colmillos) o una postura (como bajar la cabeza) específicos comunican un mensaje (FIGURA 25-8). O bien, las señales visuales son *pasivas* cuando el tamaño, la forma o el color del animal comunican información importante, por lo regular acerca de su sexo y estado de reproducción. Por ejemplo, cuando las hembras de los mandriles están listas para aparearse, desarrollan abultamientos muy coloreados en sus nalgas (FIGURA 25-9). En ocasiones, las señales activas y pasivas se combinan, como ilustra el lagarto de la FIGURA 25-10.

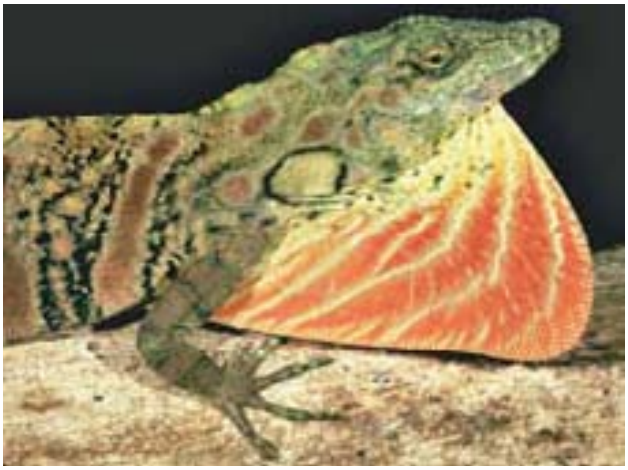


FIGURA 25-10 Combinación de señales visuales activas y pasivas
El lagarto sudamericano *Anolis* levanta la cabeza (una señal visual activa) para revelar una bolsa de color brillante en la garganta (una señal visual pasiva) y advertir a otros que guarden sus distancias.

Al igual que todas las formas de comunicación, las señales visuales tienen ventajas y desventajas. En el lado positivo, son instantáneas, y es posible modificar rápidamente las señales activas para comunicar diversos mensajes en un periodo corto. La comunicación visual es silenciosa y hay poca probabilidad de poner sobreaviso a depredadores distantes, aunque el animal sí se vuelve llamativo para los que están cerca. En el lado negativo, las señales visuales suelen ser poco eficaces en la oscuridad y donde la vegetación es densa, aunque las luciérnagas hembra envían señales a parejas potenciales utilizando patrones de destellos específicos para cada especie. Por último, las señales visuales están limitadas a la comunicación a distancias cortas.

La comunicación por sonido es eficaz a distancias más largas

El uso de sonido supera muchas de las deficiencias de las señales visuales. Al igual que estas últimas, las señales sonoras llegan a los receptores casi instantáneamente, pero, a diferencia de las señales visuales, el sonido se puede transmitir en la oscuridad, en bosques densos y en aguas turbias. Además, las señales sonoras resultan eficaces a distancias más grandes que las visuales. Por ejemplo, los graves y retumbantes bramidos del elefante africano pueden ser escuchados por elefantes que están a varios kilómetros de distancia, y el canto de las ballenas jorobadas se oye a cientos de kilómetros de su origen. Asimismo, los aullidos de una jauría de lobos se escuchan a muchos kilómetros en una noche tranquila. Incluso la pequeña rata canguro produce un sonido (golpeando el suelo con sus patas traseras) que se escucha a 45 metros de distancia.

Las señales auditivas son similares a las visuales en que son susceptibles de modificarse para comunicar mensajes que cambian rápidamente. (Pensemos en las palabras y los matices emocionales que la voz humana comunica durante una conversación). Es posible indicar los cambios de motivación con un cambio en la intensidad o el tono del sonido. Un individuo es capaz de comunicar diferentes mensajes mediante variaciones en el patrón, el volumen y el tono del sonido producido. El etólogo Thomas Struhsaker estudió a los monos vervet de Kenia en la década de 1960 y descubrió que producían diferentes gritos como respuesta a amenazas de cada uno de sus principales depredadores: serpientes, leopardos y águilas. En 1980 otros investigadores informaron que la respuesta de los monos vervet a cada uno de esos gritos era apropiada para el depredador de que se trataba. El grito semejante a un "ladrido", que advierte de un leopardo u otro carnívoro cuadrúpedo hace que los monos que están en el suelo trepen a los árboles y los que ya están en los árboles, trepen más alto. El grito "raup", que avisa de un águila u otra ave de presa, hace que los monos en el suelo miren hacia arriba y busquen refugio, mientras que los monos que ya están en los árboles bajan al abrigo de ramas más bajas y densas. Otro grito peculiar avisa de la presencia de una serpiente y hace que los monos se pongan de pie y busquen en el suelo a este depredador.

El uso de sonido de ninguna manera está limitado a las aves y los mamíferos. Los grillos macho producen cantos específicos para cada especie que atraen a las hembras apropiadas. El molesto zumbido del mosquito hembra, cuando se prepara para picar, avisa a los machos cercanos que pronto habrá ingerido la sangre necesaria para poner huevecillos.

FIGURA 25-11 Comunicación por vibración
El patinador de agua aprovecha la tensión superficial del agua para sostener su peso. Al hacer vibrar sus patas, el insecto envía señales que se propagan en forma radial por la superficie del agua. Estas vibraciones anuncian la especie y el sexo del patinador a otros insectos cercanos.

Los patinadores de agua macho hacen vibrar sus patas y envían patrones de vibraciones, específicos para cada especie, a través del agua con la finalidad de atraer hembras y repeler a otros machos (**FIGURA 25-11**). Desde estas señales más bien simples hasta la complejidad del lenguaje humano, el sonido es una de las formas más importantes de comunicación.

Los mensajes químicos persisten más tiempo y es difícil variarlos

Las sustancias químicas producidas por un individuo que influyen en el comportamiento de otros miembros de su especie se denominan **feromonas**. Las sustancias pueden transmitir mensajes a largas distancias y, a diferencia del sonido, su producción requiere muy poca energía. Es posible que otras especies, como depredadores que podrían ser atraídos por señales visuales o auditivas, ni siquiera detecten las feromonas. Como si fueran letreros, las feromonas persisten cierto tiempo y pueden comunicar un mensaje después de que el animal se ha ido. Las jaurías de lobos, que cazan en áreas de hasta 1000 kilómetros cuadrados, marcan los límites de su territorio con feromonas de la orina y advierten a otras jaurías de su presencia. Como sabe cualquiera que ha paseado un perro, los perros domesticados revelan su linaje lupino al marcar su vecindario con orina que lleva un mensaje químico: "Yo vivo en esta área".

Tal comunicación requiere que el animal sintetice y responda a una sustancia diferente para cada mensaje. Por ello, en general, se comunican menos mensajes en forma química que visual o auditivamente. Además, las señales de las feromonas no logran comunicar mensajes que cambian rápidamente. No obstante, las sustancias químicas comunican con gran fuerza unos cuantos mensajes sencillos, pero cruciales.

Muchas feromonas provocan un cambio inmediato en el comportamiento del animal que las detecta. Por ejemplo, las termitas que buscan alimento y lo encuentran dejan un rastro

FIGURA 25-12 Comunicación por mensajes químicos
Para guiar a otros miembros de la colonia a una fuente de alimento, las termitas tienden un rastro de feromonas.

de feromonas desde el alimento hasta el nido para que las demás lo sigan (FIGURA 25-12). Otras feromonas estimulan un cambio fisiológico en el animal que las detecta. Por ejemplo, la abeja reina produce una feromona llamada *sustancia de la reina*, que evita que otras hembras de la colmena maduren sexualmente. De forma similar, los machos maduros de algunas especies de ratones producen orina que contiene una feromona que influye en la fisiología reproductora de la hembra, pues la estimula para que se vuelva fértil y sexualmente receptiva. La feromona también hace que una hembra recién preñada por otro macho aborte su camada y se vuelva sexualmente receptiva hacia el nuevo macho.

Los humanos han aprovechado el poder de las feromonas para combatir las plagas de insectos. Se han sintetizado con éxito las feromonas de atracción sexual de algunas plagas agrícolas como el escarabajo japonés y la polilla gitana. Tales feromonas sintéticas pueden servir para interrumpir el apareamiento o para atraer esos insectos hacia trampas. El control de plagas con feromonas tiene importantes ventajas ecológicas respecto a los plaguicidas convencionales, los cuales matan insectos tanto benéficos como perjudiciales y propician la evolución de insectos resistentes a esas sustancias. En cambio, cada feromona es específica para una sola especie. Además, las feromonas no promueven el desarrollo de resistencia, porque los insectos resistentes a la atracción de sus propias feromonas no logran reproducirse.

La comunicación por tacto ayuda a establecer vínculos sociales

La comunicación por contacto físico entre individuos a menudo sirve para establecer y mantener vínculos sociales entre los miembros de un grupo. Esta función es muy evidente en los primates, incluido el ser humano, que tienen muchos gestos y ademanes —como besar, acurrucarse, acariciar, dar palmaditas y acicalar—, los cuales cumplen con funciones sociales importantes (FIGURA 25-13a). El tacto incluso resulta esencial para el bienestar humano. Por ejemplo, investigaciones recientes muestran que si las extremidades de bebés prematuros se acarician y mueven durante 45 minutos al día, los pequeños se vuelven más activos, sensibles y emocionalmente estables, además de que aumentan de peso con mayor rapidez que los bebés prematuros que reciben la atención acostumbrada en los hospitales.

La comunicación por tacto no se limita a los primates. En muchas otras especies de mamíferos, un contacto físico cercano ayuda a afianzar el vínculo entre un progenitor y su prole. En todo el reino animal encontramos especies en las que la actividad sexual va precedida o acompañada por contacto físico (FIGURA 25-13b).

25.3 ¿CÓMO COMPITEN LOS ANIMALES POR RECURSOS?

La lucha por sobrevivir y reproducirse de la que habló Darwin tiene su origen en la escasez de recursos en relación con el potencial reproductor de las poblaciones. La competencia resultante es la base de muchos de los tipos más frecuentes de interacciones entre los animales.

Un comportamiento agresivo ayuda a obtener y conservar recursos

Una de las manifestaciones más obvias de la competencia por recursos como alimentos, espacio o parejas es la **agresión**, o comportamiento antagónico, entre miembros de la misma especie. Aunque la expresión "supervivencia del más apto" evo-

a)

b)

FIGURA 25-13 Comunicación por tacto
a) Un babuino oliváceo adulto acicala a uno joven. Este comportamiento no sólo refuerza relaciones sociales, sino que también elimina basuras y parásitos del pelaje. ***b)*** El tacto también es importante en la comunicación sexual. Estos caracoles terrestres se enfrascan en un cortejo que culminará en el apareamiento.

a)

b)

FIGURA 25-14 Demostraciones agresivas
a) Exhibición amenazante del babuino macho. Pese a la prominente exhibición de colmillos que podrían ser letales, los encuentros agresivos entre babuinos raras veces causan lesiones. ***b)*** La exhibición agresiva de muchos peces macho, como estas blenias (*Neoclinus blanchardi*), incluye elevar las aletas y extender los opérculos con la finalidad de que el cuerpo parezca más grande.

ca imágenes del animal más fuerte que sale triunfante de entre los cadáveres de sus competidores, en realidad la mayor parte de los encuentros agresivos entre miembros de la misma especie terminan sin que los participantes sufran daños físicos. La selección natural ha favorecido la evolución de exhibiciones simbólicas o rituales para resolver conflictos. Durante los combates, incluso el animal victorioso puede sufrir lesiones, de manera que quienes pelean en serio tal vez no sobrevivan para transmitir sus genes. Las *exhibiciones* agresivas, en cambio, permiten a los competidores evaluarse mutuamente y reconocer al ganador con base en su tamaño, fuerza y motivación, más que por las heridas que puede infligir.

Durante las exhibiciones agresivas, los animales podrían mostrar sus armas, como garras y colmillos (**FIGURA 25-14a**), y a menudo adoptan comportamientos que los hacen parecer más grandes (**FIGURA 25-14b**). Los competidores a menudo se yerguen y erizan su pelaje, plumas, orejas o aletas (véase la figura 25-8). Las exhibiciones suelen ir acompañadas por sonidos intimidantes (gruñidos, graznidos, rugidos, gorjeos), cuya intensidad puede ayudar a decidir quién es el ganador. Los combates son el último recurso cuando las exhibiciones no logran resolver la disputa.

Además de las exhibiciones visuales y vocales agresivas, muchas especies animales se enfrascan en combates ritualizados. Las armas mortales podrían chocar inofensivamente (**FIGURA 25-15**) o ni siquiera usarse. En muchos casos, tales encuentros implican empujones sin provocar heridas. Así, el ritual permite a los competidores evaluar la fuerza y la motivación de sus rivales; el perdedor se aleja adoptando una postura sumisa que reduce al mínimo el tamaño de su cuerpo.

Las jerarquías de dominancia ayudan a controlar las interacciones agresivas

Las interacciones agresivas consumen mucha energía, además de que pueden causar lesiones y perturbar tareas importantes, como buscar alimento, vigilar a los depredadores o criar a la descendencia. Por ello, resulta ventajoso resolver los conflictos con un mínimo de agresión. En una **jerarquía de dominancia**, cada animal establece un rango que determina su acceso

FIGURA 25-15 Exhibiciones de fuerza
Combate ritualizado de cangrejos violinistas. Las enormes pinzas, que podrían herir gravemente a otro animal, se aprietan inofensivamente. Tarde o temprano uno de los cangrejos sentirá que su oponente es más fuerte y se retirará sin sufrir daño.

FIGURA 25-16 Una jerarquía de dominancia
El tamaño de los cuernos en los machos de los borregos cimarrón es indicativo de la jerarquía de dominancia. La categoría de estos carneros aumenta de derecha a izquierda. La cornamenta, con su curva hacia atrás, obviamente no está diseñada para infligir heridas y sólo se usa en combates ritualizados.

a los recursos. Aunque los encuentros agresivos son frecuentes en tanto se establece la jerarquía de dominancia, una vez que cada animal aprende cuál es su lugar dentro de la jerarquía las disputas se vuelven poco frecuentes y los individuos dominantes obtienen el mayor acceso a los recursos necesarios para la reproducción, lo que incluye alimento, espacio y parejas. Por ejemplo, después de reñir, las gallinas domésticas se organizan en un "orden de picoteo" relativamente estable. En adelante, cuando hay competencia por el alimento, todas las gallinas ceden ante el ave dominante, todas menos el ave dominante ceden ante la segunda en la jerarquía y así sucesivamente. En las jaurías de lobos un miembro de cada sexo es el individuo dominante o "alfa", al que todos los miembros del mismo sexo se subordinan. La dominancia entre los borregos cimarrones se refleja en el tamaño de su cornamenta (**FIGURA 25-16**).

Tal vez la jerarquía de dominancia más exhaustivamente estudiada sea la de los chimpancés. La etóloga Jane Goodall (**FIGURA 25-17**) ha dedicado más de 30 años a observar en forma meticulosa el comportamiento de los chimpancés silvestres en el Parque Nacional Gombe de Tanzania; ha descrito y documentado la compleja organización social de estos animales. Los chimpancés viven en grupos, y las jerarquías de dominancia entre los machos son un aspecto clave de su vida social. Los machos dedican una cantidad considerable de su tiempo a mantener su posición en la jerarquía, en gran parte mediante una *exhibición de arremetida* agresiva en la que un macho se abalanza contra los machos rivales, les arroja piedras, salta para sacudir la vegetación y trata de otras maneras de intimidarlos. Sin embargo, no queda claro de qué ventajas disfrutan los machos dominantes. Según Goodall, los machos de baja categoría logran obtener acceso al alimento y copular, aunque no con tanta facilidad como los de alto rango. Goodall opina que el macho dominante no obtiene mucha ventaja evolutiva y que la función de las jerarquías de dominancia entre los chimpancés requiere otra explicación.

Los animales podrían defender territorios que contienen recursos

En muchas especies animales, la competencia por los recursos adopta la forma de **territorialidad**: la defensa de una zona en la que se encuentran recursos importantes. Los recursos defendidos podrían incluir lugares para aparearse, criar la prole, alimentarse o almacenar alimentos. Los animales territoriales

FIGURA 25-17 Jane Goodall observa el juego de los chimpancés

generalmente restringen todas o casi todas sus actividades al área defendida y anuncian su presencia ahí. Los territorios podrían ser defendidos por machos, hembras, una pareja o grupos sociales enteros (como los insectos sociales que defienden su nido). No obstante, es más común ver un comportamiento territorial en los machos adultos, y los territorios normalmente se defienden contra miembros de la misma especie, que son quienes más directamente compiten por los recursos que se están protegiendo.

Los territorios son tan diversos como los animales que los defienden. Por ejemplo, un territorio puede ser un árbol en el que un pájaro carpintero almacena bellotas (**FIGURA 25-18**),

FIGURA 25-18 Un territorio de alimentación
Los pájaros carpinteros belloteros viven en grupos comunales que hacen agujeros del tamaño de una bellota en árboles muertos y los llenan con bellotas verdes para alimentarse durante los meses de escasez invernal. El grupo defiende los árboles vigorosamente contra otros grupos de carpinteros belloteros y contra aves de otras especies que también se alimentan de bellotas, como los grajos.

pequeñas depresiones en la arena que los peces cíclidos utilizan como lugares de crianza, un agujero en la arena que sirve de hogar a un cangrejo o una área del bosque que suministra alimento a una ardilla.

La territorialidad reduce la agresión

Adquirir y defender un territorio requiere tiempo y energía considerables; pese a ello, se observa territorialidad en animales tan diversos como gusanos, artrópodos, peces, aves y mamíferos. El hecho de que organismos tan distintos como los gusanos y los seres humanos hayan desarrollado de manera independiente un comportamiento similar, sugiere que la territorialidad ofrece ciertas ventajas importantes. Aunque los beneficios concretos dependen de la especie y del tipo de territorio que defiende, podemos hacer algunas generalizaciones. Primera, al igual que con las jerarquías de dominancia, una vez que se establece un territorio mediante interacciones agresivas, prevalece una paz relativa cuando se reconocen y respetan las fronteras. El dicho "buenas cercas hacen buenos vecinos" también es válido para los territorios no humanos. Una razón es que el animal se siente muy motivado para defender su territorio y a menudo derrota a animales incluso más grandes y fuertes que intentan invadirlo. Por otra parte, un animal que está fuera de su territorio se siente mucho menos seguro y se le puede derrotar con mayor facilidad. Niko Tinbergen demostró este principio en un experimento con peces espinosos (**FIGURA 25-19**).

La competencia por las parejas podría estar basada en territorios

Para los machos de muchas especies, el éxito en la defensa de su territorio tiene un efecto directo sobre su éxito en la reproducción. En esas especies los machos defienden los territorios y las hembras se sienten atraídas hacia un territorio de cría de alta calidad, que podría distinguirse por su gran extensión, alimento abundante y áreas de anidación protegidas. Los machos que defienden con éxito los mejores territorios tienen mayor probabilidad de aparearse y transmitir sus genes. Por ejemplo, ciertos experimentos han demostrado que los peces espinosos macho que defienden territorios grandes atraen a más hembras que los que defienden territorios pequeños. Las hembras que escogen machos con los mejores territorios incrementan su propio éxito en la reproducción y transmiten sus rasgos genéticos (que por lo regular incluyen sus preferencias en la selección de pareja) a sus descendientes.

Los animales anuncian su ocupación

Los territorios se anuncian a la vista, el oído y el olfato. Si un territorio es pequeño, la mera presencia de su dueño, reforzada por exhibiciones agresivas frente a los intrusos, será una defensa suficiente. Un mamífero que posee un territorio en el que no siempre puede estar usará feromonas para marcar sus fronteras territoriales. Los conejos macho utilizan feromonas secretadas por las glándulas de su mentón y por las glándulas anales para marcar sus territorios. Los hámsteres frotan las áreas en torno a sus guaridas con secreciones de glándulas especiales que tienen en sus costados.

Las señales vocales son una forma común de anuncio territorial. Los leones marinos macho defienden una franja de playa nadando de un lado a otro frente a ella y bramando continuamente. Los grillos macho producen un patrón específico de chirridos para advertir a otros machos que se alejen de su guarida. El canto de las aves es un notable ejemplo de defensa territorial. El grave gorjeo del gorrión costero macho forma parte de una exhibición agresiva y advierte a otros machos que se alejen de su territorio (**FIGURA 25-20**). De hecho, los gorriones macho incapaces de cantar no logran defender territorios. La ornitóloga M. Victoria McDonald demostró de forma elegante la importancia del canto para la defensa territorial del gorrión costero, para lo cual capturó machos territoriales y realizó una operación que temporalmente les impidió cantar, aunque sí podían emitir las otras señales, más cortas y menos audibles, de su repertorio vocal. Los machos que no cantaban no lograron defender territorios ni atraer pareja, pero recuperaron sus territorios perdidos una vez que pudieron cantar de nuevo.

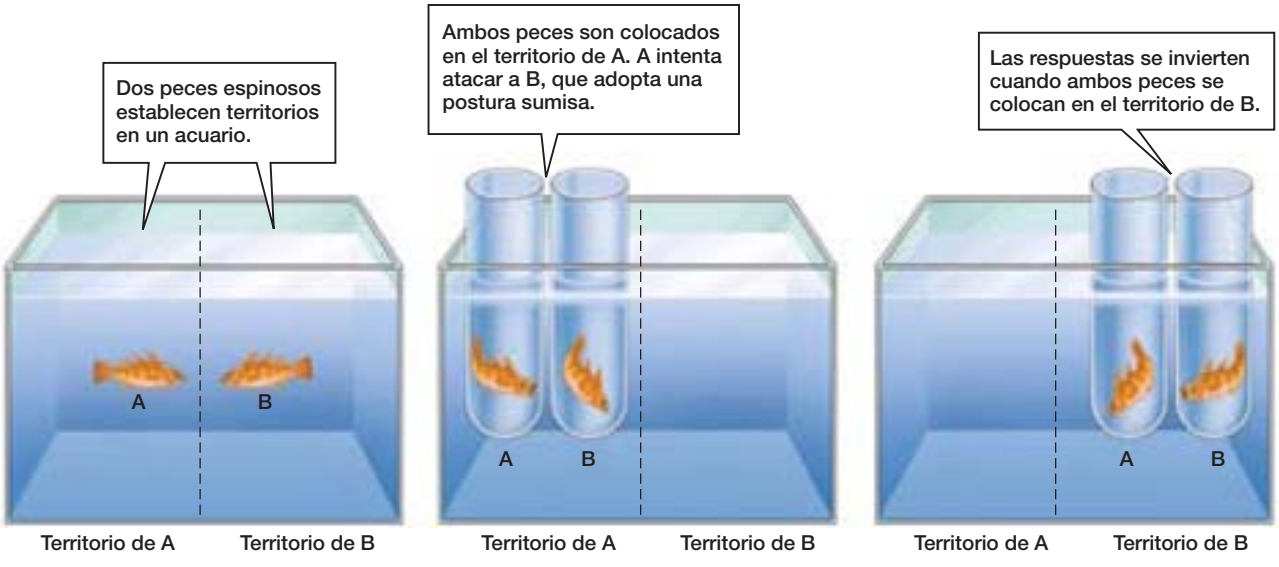

Dos peces espinosos establecen territorios en un acuario.
Ambos peces son colocados en el territorio de A. A intenta atacar a B, que adopta una postura sumisa.
Las respuestas se invierten cuando ambos peces se colocan en el territorio de B.
A
B
A
B
A
B
Territorio de A
Territorio de B
Territorio de A
Territorio de B
Territorio de A
Territorio de B

FIGURA 25-19 **Propiedad territorial y agresión**

FIGURA 25-20 Defensa de un territorio mediante el canto
Un gorrión costero macho anuncia que un territorio le pertenece.

25.4 ¿CÓMO ENCUENTRAN PAREJA LOS ANIMALES?

En muchas especies animales que se reproducen sexualmente, el apareamiento implica cópula u otro contacto cercano entre el macho y la hembra. Antes de que pueda haber apareamiento, los animales se deben identificar mutuamente como miembros de la misma especie, como miembros del sexo opuesto y como sexualmente receptivos. En muchas especies, hallar una pareja potencial apropiada es sólo el primer paso, porque el macho debe demostrar sus cualidades para que la hembra lo acepte como pareja. La necesidad de cumplir con todos estos requisitos ha dado origen a una gama muy diversa y fascinante de comportamientos de cortejo.

Las señales vocales y visuales codifican el sexo, la especie y la calidad individual

Los individuos que desperdician energía y gametos apareándose con miembros del sexo o la especie equivocados están en desventaja en la lucha por reproducirse. Por ello, la selección natural favorece los comportamientos mediante los cuales los animales comunican su sexo y su especie a las parejas potenciales.

Muchas señales de apareamiento son acústicas

Los animales a menudo utilizan sonidos para indicar su sexo y su especie. Consideremos, por ejemplo, el coro nocturno de las ranas arborícolas macho, cada uno de los cuales croa un canto específico para su especie. Los saltamontes y grillos macho también anuncian su sexo y su especie con sus chirridos, lo mismo que el mosquito hembra con su agudo zumbido.

Las señales que codifican el sexo y la especie también podrían servir a las parejas potenciales como base para comparar pretendientes rivales. Por ejemplo, el pájaro campana macho utiliza su ensordecedor canto para defender vastos territorios y atraer hembras que se encuentran a grandes distancias. Las hembras vuelan de un territorio a otro, posándose cerca del macho en su árbol. El macho, con el pico bien abierto, se inclina directamente encima de la encogida hembra y emite una nota estridente. Al parecer, la hembra soporta este sonido con la finalidad de comparar el volumen de los distintos machos y escoge como pareja al que canta más fuerte.

También son comunes las señales visuales de apareamiento

Muchas especies utilizan señales visuales para cortejar. La luciérnaga, por ejemplo, destella un mensaje que codifica su sexo y su especie. Las lagartijas macho mueven verticalmente la cabeza con un ritmo específico para cada especie, y las hembras distinguen y prefieren el ritmo de su propia especie. Los intrincados proyectos de construcción del pájaro satinado de enramada y la garganta color escarlata del pájaro fragata macho sirven como llamativos anuncios que indican el sexo, la especie y la calidad del macho (**FIGURA 25-21**). La exhibición de tan extravagantes señales es riesgosa, pues es fácil que los depredadores localicen su origen. Para los machos, el riesgo es una necesidad evolutiva, pues las hembras no se aparean con machos que no presentan la señal apropiada. En contraste, las hembras por lo regular no necesitan atraer a los machos ni asumir el riesgo asociado a una señal llamativa, por

a)

b)

FIGURA 25-21 Exhibiciones sexuales
a) Durante el cortejo, el pájaro satinado construye una enramada con varitas y la decora con objetos coloreados que reúne. ***b)*** Un pájaro fragata macho infla el saco escarlata de su papada para atraer a las hembras que pasan. PREGUNTA: El pájaro satinado de enramada macho no brinda protección, alimento o algún otro tipo de cuidado a su pareja ni a su descendencia. ¿Por qué entonces las hembras comparan cuidadosamente las enramadas de diferentes machos antes de elegir pareja?

FIGURA 25-22 Dimorfismo sexual en los gupis
Al igual que en muchas otras especies animales, el gupi macho (izquierda) suele tener colores mucho más brillantes que la hembra.

lo que las hembras de muchas especies son poco atractivas en comparación con los machos (FIGURA 25-22).

Las funciones interrelacionadas de reconocimiento del sexo y de la especie, el anuncio de la calidad individual y la sincronización del comportamiento reproductor generalmente requieren una serie compleja de señales, tanto activas como pasivas, por parte de ambos sexos. Una bella ilustración de tales señales es el complejo "ballet" subacuático que ejecutan los peces espinosos de tres púas, macho y hembra (FIGURA 25-23).

Las señales químicas unen a las parejas

Las feromonas pueden desempeñar un papel importante en el comportamiento reproductivo. Por ejemplo, cuando una polilla de la seda hembra está lista para aparearse, se queda quieta y emite un mensaje químico tan potente que los machos logran detectarlo a una distancia de hasta 5 kilómetros. Los receptores de las antenas de la polilla macho, exquisitamente sensibles y selectivos, responden a unas cuantas moléculas de la sustancia y le permiten seguir el gradiente de concentración viento arriba para hallar a la hembra (FIGURA 25-24a).

El agua es un excelente medio para dispersar señales químicas, y los peces suelen utilizar una combinación de feromonas y complejos movimientos de cortejo para asegurar la sincronía en la liberación de gametos. En los mamíferos, cuyo sentido del olfato está tan desarrollado, las hembras liberan feromonas durante sus periodos fértiles para atraer a los machos (FIGURA 25-24b).

25.5 ¿QUÉ TIPOS DE SOCIEDADES FORMAN LOS ANIMALES?

El comportamiento social es una característica generalizada de la vida animal. Casi todos los animales tienen alguna interacción con otros individuos de su especie; muchos pasan casi toda su vida en compañía de otros y unas cuantas especies han desarrollado sociedades complejas y sumamente estructuradas. La interacción social puede estar basada en la cooperación o en la competencia y por lo regular es una mezcla de las dos formas.

La vida en grupo tiene ventajas y desventajas

Vivir en un grupo tiene tanto costos como beneficios. Una especie no desarrollará una conducta social si los beneficios de hacerlo son menores que los costos.

He aquí algunos costos que los animales sociales podrían enfrentar:

- Mayor competencia dentro del grupo por recursos limitados
- Mayor riesgo de infección de enfermedades contagiosas
- Mayor riesgo de que otros miembros del grupo maten a la prole
- Mayor riesgo de ser detectados por los depredadores

Los beneficios que obtienen los animales sociales incluyen:

- Mayor capacidad para detectar, repeler y confundir a los depredadores
- Mayor eficiencia al cazar o mayor capacidad para encontrar recursos alimenticios localizados
- Ventajas como resultado del potencial para la división del trabajo dentro del grupo
- Mayor probabilidad de encontrar pareja

El comportamiento social varía entre especies

El grado de cooperación entre animales de la misma especie varía considerablemente de una especie a otra. Algunos tipos de animales, como el puma, son básicamente solitarios; las interacciones de los adultos consisten en breves encuentros agresivos y en apareamientos. Otros animales cooperan dependiendo de cómo cambien las necesidades. Por ejemplo, el coyote es solitario cuando abunda el alimento, pero caza en jauría en invierno, cuando el alimento escasea.

Los agrupamientos sociales con lazos débiles, como los grupos de delfines, los cardúmenes de peces, las parvadas de aves y las manadas de toros almizcleros (FIGURA 25-25) ofrecen diversos beneficios. Por ejemplo, el espaciado característico de los peces en los cardúmenes o el patrón con forma de V que adoptan los gansos al volar brindan una ventaja hidrodinámica o aerodinámica a cada individuo del grupo, pues reduce la energía necesaria para nadar o volar. Algunos biólogos sostienen que las manadas de antílopes y los cardúmenes de peces confunden a los depredadores: la multitud de cuerpos dificulta que el depredador se concentre en un individuo y lo persiga.

Algunas especies forman sociedades complejas

En el otro extremo del espectro social están unas cuantas sociedades cooperativas muy bien integradas, que se observan principalmente entre los insectos y los mamíferos. Al leer el siguiente apartado te darás cuenta de que algunas sociedades cooperativas se basan en comportamientos que aparentemente sacrifican al individuo por el bien del grupo. Hay muchos ejemplos: los grajos de matorral de Florida jóvenes, pero sexualmente maduros, podrían permanecer en el nido de sus padres y ayudarles a criar nidadas subsiguientes en vez de tener sus propias crías; las ardillas terrestres de Belding podrían sacrificar su vida para advertir al resto de su grupo de un depredador que se aproxima. Estos comportamientos son ejemplos de **altruismo**: una conducta que reduce el éxito reproductivo de un individuo en beneficio de otro.

a) Un macho, sin colores llamativos, abandona el cardumen de machos y hembras para establecer un territorio de cría.

b) El vientre del macho adopta el color rojo que indica su deseo de aparearse; el pez presenta comportamientos agresivos frente a otros machos de vientre rojo, mostrando esa área de su cuerpo.

c) Una vez que establece un territorio, el macho comienza a construir un nido excavando una fosa poco profunda que llena con trozos de alga aglutinados con una secreción pegajosa de sus riñones.

d) Después de hacer un túnel dentro del nido con su cuerpo, el dorso del macho comienza a adquirir el color azul de cortejo que lo hace atractivo para la hembra.

e) Una hembra que lleva huevecillos muestra al macho su vientre distendido adoptando una postura vertical. Su vientre hinchado y sus colores de cortejo son exhibiciones visuales pasivas.

f) Con una danza en zigzag, el macho conduce a la hembra al nido.

g) Una vez que la hembra entra, el macho la estimula con empujones en la base de la cola para que deposite sus huevecillos.

h) El macho entra en el nido cuando ella sale y deposita espermatozoides, que fecundan los huevecillos.

FIGURA 25-23 Cortejo del pez espinoso de tres púas

La formación de grupos con parientes fomenta el desarrollo del altruismo

¿Cómo pudo la evolución producir tales comportamientos? Cuando los individuos realizan actos de sacrificio, ¿por qué los alelos que contribuyen a este comportamiento no se eliminan de la poza génica? Una posibilidad es que otros miembros del grupo son parientes cercanos del individuo altruista. Puesto que los individuos estrechamente emparentados comparten alelos, el individuo altruista promueve la supervivencia de sus propios alelos a través de conductas que aumentan las posibilidades de supervivencia de sus parientes cercanos. Este concepto se denomina **selección de linaje** y ayuda a explicar diversos comportamientos altruistas que contribuyen al éxito de las sociedades cooperativas. En los siguientes apartados se describen dos ejemplos de sociedades complejas que ilustran el comportamiento cooperativo: uno en insectos y otro en mamíferos.

a)

b)

FIGURA 25-24 Detectores de feromonas
a) La polilla de la seda macho encuentra a las hembras no por medio de la vista, sino siguiendo las feromonas que éstas liberan. Estos olores se detectan con receptores en las enormes antenas del macho, cuya extensa área superficial aumenta al máximo la posibilidad de detectar el aroma femenino. ***b)*** Cuando los perros se encuentran, por lo regular se olisquean mutuamente cerca de la base de la cola. Las glándulas odoríferas que están ahí difunden información acerca del sexo y del interés en el apareamiento. PREGUNTA: Los perros hembra utilizan una feromona para indicar si están dispuestas a aparearse, pero las hembras de mandril (véase la figura 25-9) utilizan una señal visual para indicar su disposición para el apareamiento. ¿Qué diferencias crees que haya entre los métodos para buscar alimento de las dos especies?

Las abejas viven juntas en sociedades de estructura rígida

Quizá las sociedades animales más desconcertantes de todas sean las de las abejas, las hormigas y las termitas. Desde hace mucho, los científicos se han esforzado por explicar la evolución de una estructura social en la que la mayoría de los individuos nunca se reproducen y, en vez de ello, trabajan servilmente para alimentar y proteger a la prole de un individuo distinto. Sea cual fuere su explicación evolutiva, la intrincada organización de una colonia de insectos sociales resulta muy interesante. En tales comunidades el individuo no es más que un engranaje de una compleja maquinaria que opera a la perfección y que no podría sobrevivir por sí solo.

Cada uno de los insectos sociales nace en el seno de una de varias castas dentro de la sociedad. Estas castas son grupos de individuos similares que desempeñan una función específica. Cuando las abejas salen de su etapa larvaria, asumen uno de tres papeles preestablecidos. Un papel es el de *reina*. En una colmena sólo existe una reina. Sus funciones consisten en producir óvulos (hasta 1000 al día durante una vida de 5 a 10 años) y regular la vida de las obreras. Las abejas macho, llamadas *zánganos*, sólo sirven como parejas para la reina. Tan pronto como la reina nace, los zánganos son atraídos por las feromonas sexuales que emite; la reina se aparea con unos 15 de ellos. Esta "orgía" relativamente breve provee a la reina suficientes espermatozoides para fertilizar más de 3 millones de óvulos, de manera que alcanzan para toda su vida. Luego de haber cumplido con su tarea sexual, los zánganos se vuelven superfluos y finalmente serán expulsados de la colmena o muertos.

La operación de la colmena corre por cuenta de la tercera clase de abejas: hembras estériles llamadas *obreras*. Las tareas de una obrera dependen de su edad y de las condiciones en la

FIGURA 25-25 Cooperación en grupos sociales débilmente organizados
Una manada de toros almizcleros funciona como una unidad al ser amenazada por depredadores como los lobos. Los machos forman un círculo con los cuernos hacia fuera y rodean a las hembras y sus crías.

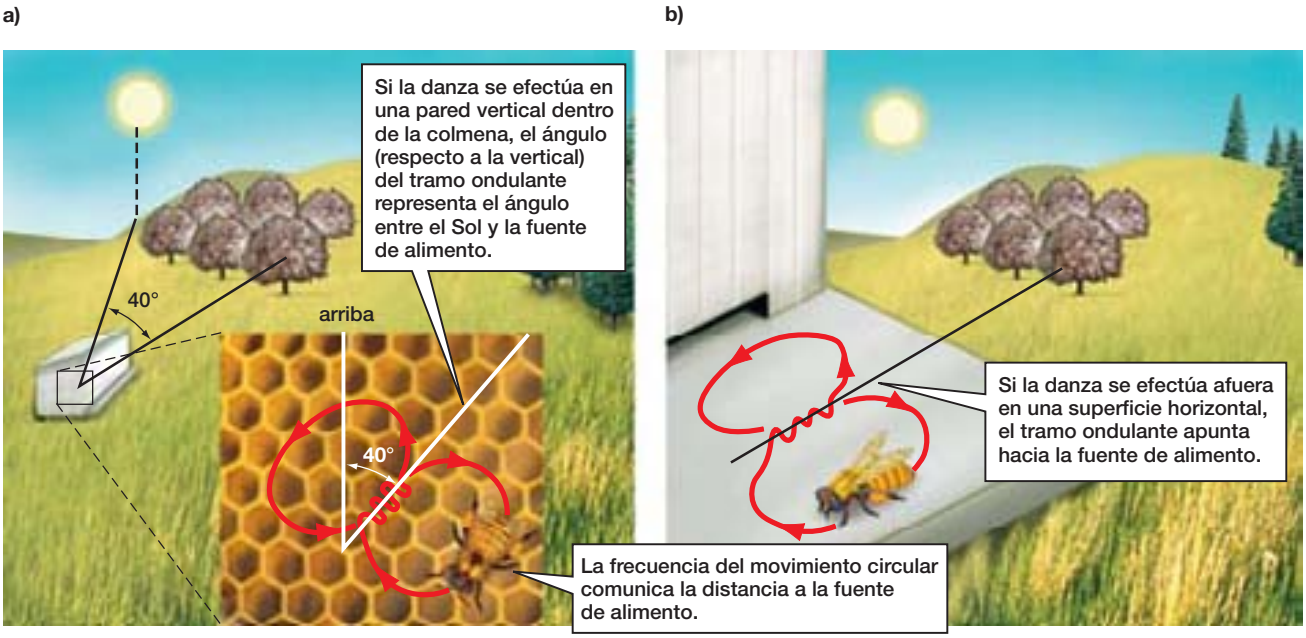

a)
b)
Si la danza se efectúa en una pared vertical dentro de la colmena, el ángulo (respecto a la vertical) del tramo ondulante representa el ángulo entre el Sol y la fuente de alimento.
40°
arriba
40°
Si la danza se efectúa afuera en una superficie horizontal, el tramo ondulante apunta hacia la fuente de alimento.
La frecuencia del movimiento circular comunica la distancia a la fuente de alimento.

FIGURA 25-26 El lenguaje de las abejas: la danza ondulante
Una recolectora, cuando encuentra una rica fuente de néctar, regresa a la colmena e inicia una danza ondulante que comunica la distancia y la dirección en la que está la fuente de alimento, mientras otras obreras se agolpan a su alrededor y la tocan con sus antenas. La abeja se mueve en línea recta, mientras sacude su abdomen hacia los lados y hace vibrar sus alas; repite los movimientos una y otra vez en el mismo lugar, alternando el sentido de los círculos que describe.

colonia. Una obrera recién salida del estado larvario trabaja como "camarera": lleva alimento —miel y polen— a la reina, a otras obreras y a las larvas en desarrollo. Al madurar, ciertas glándulas especiales comienzan a producir cera y la obrera se convierte en constructora, moldeando celdas de cera perfectamente hexagonales donde la reina depositará sus huevos y las larvas se desarrollarán. También realizará funciones de limpieza, aseando la colmena y sacando cadáveres; además, se desempeñará como guardia, protegiendo a la colmena contra intrusos. Su último papel en la vida es el de recolectora, recogiendo polen y néctar como alimento para la colmena. La obrera dedicará casi la mitad de su vida de dos meses a esta función. Al actuar como recolectora y exploradora, buscará nuevas y abundantes fuentes de néctar y, al hallar una, volverá a la colmena y comunicará su ubicación a otras recolectoras. Esa comunicación consiste en una **danza ondulante**: una elegante forma de expresión simbólica (FIGURA 25-26).

Las feromonas desempeñan un papel importante en la regulación de la vida de los insectos sociales. Los zánganos son atraídos irresistiblemente por la feromona sexual de la reina (llamada *sustancia de la reina*), que ésta libera durante sus vuelos de apareamiento. Una vez que regresa a la colmena, la abeja utiliza la misma sustancia para mantener su posición como única hembra fértil. Algunas obreras lamen esa sustancia del cuerpo de la reina y la distribuyen entre todas las demás, con lo que se vuelven estériles. La presencia y salud de la reina se manifiestan por su producción continuada de la sustancia de la reina; una baja en la producción altera el comportamiento de las obreras. Casi de inmediato comienzan a construir "celdas reales" extragrandes y alimentan a las larvas que crecen en esas celdas con una secreción glandular especial llamada "jalea real". Este singular alimento altera el desarrollo de las larvas, de manera que, en vez de una obrera, una nueva reina surge de la celda real. La antigua reina abandonará entonces la colmena, llevándose consigo un enjambre de obreras para establecer su residencia en otro lugar. Si hay más de una nueva reina, se enfrascarán en un combate a muerte y la reina victoriosa se hará cargo de la colmena.

Las ratas topo desnudas forman una sociedad compleja de vertebrados

Los sistemas nerviosos de los vertebrados son mucho más complejos que los de los insectos, por lo que cabe esperar que las sociedades de vertebrados sean proporcionalmente más complejas. Sin embargo, con la excepción de la sociedad humana, no lo son. Quizá la sociedad más extraña entre los mamíferos no humanos sea la de la rata topo desnuda (FIGURA 25-27). Estos parientes cercanos del cobayo, casi ciegos y sin

FIGURA 25-27 Una rata topo desnuda reina descansa sobre un grupo de obreros

pelo, viven en grandes colonias subterráneas en el sur de África y tienen una forma de organización social parecida a la de una colonia de hormigas, que no existe en ninguna otra sociedad de mamíferos. Una reina domina la colonia, pues hay una sola hembra reproductora a la cual están subordinados todos los demás miembros.

La reina es el individuo más grande de la colonia y mantiene su categoría mediante un comportamiento agresivo, que consiste principalmente en empujones. La reina empuja a los obreros perezosos, estimulándolos para que se vuelvan más activos. Al igual que en las colmenas de abejas, los obreros se reparten el trabajo, en este caso con base en el tamaño. Las ratas pequeñas jóvenes limpian los túneles, reúnen alimento y escarban. Al hacer túneles, las ratas forman una fila y desplazan la tierra excavada por el túnel ya terminado hasta una abertura. Justo abajo de la abertura, una rata topo más grande avienta la tierra hacia arriba, añadiéndola a un montículo cónico. Los biólogos que observaron este comportamiento desde la superficie lo llamaron "hacer volcanes". Además de hacer volcanes, las ratas topo grandes defienden a la colonia contra depredadores y miembros de otras colonias.

Si otra hembra comienza a volverse fértil, la reina, al parecer, detecta cambios en los niveles de estrógeno de la orina de la hembra subordinada. Entonces, la reina empuja selectivamente a su rival y le causa tensión para impedir que ovule. Los machos grandes tienen mayores posibilidades de aparearse con la reina que los pequeños, aunque todos los machos adultos son fértiles. Cuando la reina muere, unas cuantas de las hembras aumentan de peso y comienzan a empujarse mutuamente. La agresión se intensifica hasta que una de las rivales muere. Al final una sola hembra se vuelve dominante. Su cuerpo se alarga, se convierte en reina y comienza a reproducirse, dando camadas de 14 crías en promedio unas cuatro veces al año. Durante el primer mes, la reina amamanta a sus crías y los obreros alimentan a la reina. Luego los obreros comienzan a alimentar a las crías con comida sólida.

25.6 ¿LA BIOLOGÍA LOGRA EXPLICAR EL COMPORTAMIENTO HUMANO?

El comportamiento de los seres humanos, al igual que los de todos los demás animales, tiene una historia evolutiva, de manera que las técnicas y los conceptos de la etología pueden ayudarnos a entenderlo y explicarlo. No obstante, la etología humana es, y seguirá siendo, una ciencia menos rigurosa que la etología animal. No podemos tratar a las personas como animales de laboratorio, ideando experimentos que controlen y manipulen los aspectos que influyen en nuestras actitudes y acciones. Además, algunos observadores afirman que la cultura humana se liberó de las restricciones de su pasado evolutivo hace tanto tiempo que no es posible explicar nuestra conducta en términos de evolución biológica. No obstante, muchos científicos han adoptado un enfoque etológico evolutivo para estudiar el comportamiento humano y sus trabajos han producido un efecto importante sobre la perspectiva de nosotros mismos.

El comportamiento de los recién nacidos tiene un componente innato importante

FIGURA 25-28 Un instinto humano
La succión del pulgar es un hábito difícil de erradicar en los niños pequeños porque chupar objetos del tamaño apropiado es un comportamiento instintivo de búsqueda de alimento. Este feto se chupa el pulgar a los cuatro y medio meses de su desarrollo.

han tenido mucho tiempo para aprender. El movimiento rítmico de la cabeza de un bebé en busca del pecho de la madre es un comportamiento innato que se expresa en los primeros días después del nacimiento. La acción de chupar, que se puede observar incluso en los fetos humanos, también es innata (FIGURA 25-28). Otros comportamientos que se observan en los recién nacidos e incluso en bebés prematuros incluyen asir con las manos y los pies, así como movimientos que simulan la marcha cuando el cuerpo está suspendido.

Otro ejemplo es la sonrisa, que puede presentarse poco después del nacimiento. En un principio, casi cualquier objeto que aparezca ante los ojos del recién nacido podría suscitar una sonrisa, pero la experiencia pronto modifica este comportamiento inicial indiscriminado. Bebés de hasta dos meses de edad sonríen en respuesta a un estímulo que consta de dos manchas oscuras, del tamaño de un ojo, sobre un fondo claro, que en esa etapa del desarrollo es un estímulo más potente para provocar la sonrisa que una representación exacta de un rostro humano. Sin embargo, conforme el niño crece, el aprendizaje y el desarrollo ulterior del sistema nervioso interactúan para limitar la respuesta a representaciones más correctas de un rostro.

Es posible condicionar a un recién nacido durante sus primeros tres días de vida para producir ciertos ritmos de succión cuando la voz de su madre se utiliza como reforzamiento. En los experimentos, los bebés prefirieron escuchar la voz de sus propias madres que otras voces femeninas, como indicaron sus respuestas (FIGURA 25-29). La capacidad del bebé para distinguir la voz de su madre y responder positivamente a ella dentro de los primeros días después del nacimiento tiene una fuerte analogía con la formación de la impronta y puede ayudar a iniciar el vínculo con la madre.

Los humanos adquieren el lenguaje fácilmente desde pequeños

aprendizaje que son importantes para el modo de vida de su especie. En el ser humano, una de esas predilecciones innatas parece apuntar a la adquisición de lenguaje. Los niños pequeños pueden adquirir lenguaje rápidamente y casi sin esfuerzo; por lo regular adquieren un vocabulario de unas 28,000 palabras antes de cumplir los ocho años. Un gran número de investigaciones sugieren que, al nacer, nuestro cerebro ya cuenta con esta facilidad temprana para el lenguaje. Por ejemplo, el feto humano comienza a responder a sonidos durante el tercer trimestre del embarazo, y los investigadores han demostrado que los bebés pueden distinguir diversos sonidos de consonantes a las seis semanas de nacidos. En el experimento, un bebé respondió a la presentación de diversos sonidos de consonante succionando un chupón que contenía un transductor de fuerza para registrar la intensidad de succión. Cuando se presentaba de forma repetida un sonido (digamos, "ba"), el bebé se habituaba y reducía su intensidad de succión. En cambio, cuando se presentaba un sonido nuevo (como "pa"), la intensidad de succión aumentaba, revelando que el pequeño percibía el nuevo sonido como diferente.

Los comportamientos comunes a culturas diversas podrían ser innatos

Otra forma de estudiar las bases innatas del comportamiento humano es comparar actos sencillos realizados por personas de diferentes culturas. Este enfoque comparativo, adoptado inicialmente por el etólogo Irenaus Eibl-Eibesfeldt, ha revelado varios gestos y ademanes que al parecer constituyen un sistema humano de señales universal y probablemente innato. Esto incluye diversas expresiones faciales para indicar placer, ira y desdén, así como movimientos de saludo como la mano levantada o el "destello ocular" (en el que los ojos se abren al máximo y las cejas se elevan rápidamente). Es de suponer que la evolución de estos mensajes "configurados" dependió de las ventajas que obtenían tanto quienes los enviaban como quienes los recibían, al compartir información acerca del estado emocional y las intenciones del emisor. Es probable que, antes de la aparición del lenguaje, haya sido muy importante contar con un método de comunicación general para toda la especie y que después haya seguido siendo útil durante encuentros entre individuos que no tenían un lenguaje común.

Los comportamientos sociales complejos también pueden estar muy extendidos entre culturas diversas. Por ejemplo, el tabú contra el incesto (evitar aparearse con parientes cercanos) parece ser universal en todas las culturas humanas (e incluso en muchas especies de primates no humanos). A pesar de la universalidad del tabú, parece poco probable que una creencia compartida pudiera estar codificada en nuestros genes. Algunos biólogos han sugerido que el tabú es más bien una expresión cultural de un comportamiento adaptativo evolucionado. Según esta hipótesis, un contacto cercano entre miembros de la familia en los primeros años de vida suprime el deseo sexual y este efecto surgió por las consecuencias perjudiciales de la endogamia (por ejemplo, una mayor incidencia de enfermedades genéticas). La hipótesis no nos obliga a suponer una creencia social innata, más bien propone que heredamos un programa de aprendizaje que nos hace pasar por una especie de impronta en los primeros años de vida.

Las personas podrían responder a feromonas

FIGURA 25-29 Los recién nacidos prefieren la voz de su madre Utilizando un chupón conectado a una computadora que reproduce cintas de audio, el investigador William Fifer demostró que es posible condicionar a los recién nacidos para que succionen con ritmos específicos a cambio del privilegio de escuchar la voz de su madre a través de audífonos. Por ejemplo, si el bebé succiona con mayor rapidez que la normal, se reproduce la voz de su madre; si succiona más lentamente, se reproduce la voz de otra mujer. Los investigadores descubrieron que los pequeños aprendían fácilmente y estaban dispuestos a esforzarse en esa tarea sólo para escuchar la voz de su madre, quizá porque se acostumbraron a ella cuando estaban en su vientre.

Aún no se ha esclarecido la naturaleza de las moléculas que causaron los efectos documentados por McClintock y tampoco su función. (¿De qué podría servir a una mujer influir en el ciclo menstrual de otras mujeres?). Todavía no se han encontrado receptores de mensajes químicos en el ser humano, y no sabemos si las "feromonas menstruales" son el primer ejemplo conocido de un importante sistema de comunicación o si sólo constituyen un caso aislado de una capacidad residual. Pese a los optimistas anuncios de "feromonas de atracción sexual" en los programas de televisión nocturnos, la comunicación química en el ser humano es un misterio científico que aún no se resuelve.

Estudios con gemelos revelan los componentes genéticos del comportamiento

Los gemelos presentan la que quizá sea la mejor oportunidad de examinar la hipótesis de que las diferencias en el comportamiento humano están relacionadas con diferencias genéticas. Si en un comportamiento dado influyen de manera importante los factores genéticos, deberíamos observar una expresión similar de ese comportamiento en los *gemelos idénticos* (que provienen de un solo óvulo fecundado y, por lo tanto, tienen genes idénticos), pero no en los *gemelos fraternos* (que provienen de dos óvulos distintos y no son más similares genéticamente que dos hermanos). Datos de estudios con gemelos, y de otras investigaciones intrafamiliares, en general han confirmado el carácter hereditario de muchos rasgos del comportamiento humano. Tales estudios han documentado un importante componente genético de rasgos como nivel de actividad, alcoholismo, sociabilidad, ansiedad, inteligencia, dominancia e incluso actitudes políticas. Con base en pruebas diseñadas para medir muchos aspectos de la personalidad, sabemos que los gemelos idénticos tienen personalidades dos veces más parecidas que los fraternos.

Los resultados más fascinantes obtenidos con gemelos se basan en observaciones de gemelos idénticos separados poco después del nacimiento, que se criaron en entornos distintos y que se reencuentran por primera vez cuando son adultos. Se ha descubierto que los gemelos idénticos que se crían por separado tienen personalidades tan parecidas como los que se criaron juntos, lo que indica que las diferencias en sus entornos casi no influyeron sobre el desarrollo de su personalidad. Se ha visto que tienen gustos casi idénticos en cuanto a alhajas, ropa, humor, alimentos y nombres para sus hijos y mascotas. En algunos casos, estos gemelos que no se conocen comparten idiosincrasias personales como emitir risitas, comerse las uñas, patrones para beber, hipocondría y fobias menores.

La investigación biológica del comportamiento humano genera controversia

El campo de la genética del comportamiento humano genera controversias, especialmente entre los legos, porque desafía la creencia arraigada durante mucho tiempo de que el entorno es el determinante más importante del comportamiento humano. Como vimos antes en este capítulo, ahora se acepta que todos los comportamientos tienen alguna base genética y que un comportamiento complejo en animales no humanos por lo regular combina elementos de comportamientos tanto innatos como aprendidos. Por consiguiente, es probable que en nuestro comportamiento influyan nuestra historia evolutiva y nuestra herencia cultural. El debate acerca de la importancia relativa de la herencia y el ambiente para determinar la conducta humana continúa y es poco probable que alguna vez se resuelva plenamente. La etología humana todavía no se reconoce como una ciencia rigurosa y siempre enfrentará obstáculos porque no podemos vernos a nosotros mismos con total objetividad, ni realizar experimentos con la gente como si se tratara de ratas de laboratorio. Pese a tales limitaciones, hay mucho que aprender acerca de la interacción del aprendizaje y las tendencias innatas en los seres humanos.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

¿Por qué juegan los animales?

Pigface, una tortuga africana de caparazón blando de 50 años de edad, pasa varias horas del día dando aletazos a una pelota en su tanque del Zoológico Nacional de Washington, D. C., para el deleite de miles de visitantes y la perplejidad de los biólogos del comportamiento. El juego siempre ha sido una especie de misterio. Se ha observado en muchas aves y en la mayoría de los mamíferos, pero, hasta que los cuidadores del zoológico lanzaron una pelota a Pigface hace unos años, nunca se había observado en animales tan antiguos desde el punto de vista evolutivo como las tortugas.

Los animales que juegan son fascinantes. Los hipopótamos pigmeos se empujan unos a otros, sacuden y avientan la cabeza, chapotean en el agua y hacen piruetas parados sobre sus patas traseras. A las nutrias les encanta efectuar complejas acrobacias. Los delfines nariz de botella equilibran peces sobre su hocico, lanzan objetos y los llevan en la boca mientras nadan. Los murciélagos vampiro recién nacidos se persiguen unos a otros, forcejean y se dan palmadas con las alas. Incluso se ha observado a pulpos jugar a atrapar cosas: empujan un objeto de forma que se aleje para que luego una corriente de agua lo regrese, lo que repiten una y otra vez.

Un animal que juega solo por lo regular manipula algún objeto, como un gato con una bola de estambre, el delfín con un pescado o un macaco que hace una bola de nieve y juega con ella. El juego también puede ser social. Es común que individuos jóvenes de la misma especie jueguen juntos, pero sus progenitores podrían unírseles (**FIGURA 25-30a**). El juego social por lo regular incluye persecución, huida, forcejeo, patadas y mordidas suaves (**FIGURA 25-30b, c**

a)

b)

c)

FIGURA 25-30 **Animales jóvenes que juegan**

juego es la "teoría de la práctica", que sugiere que el juego permite a los animales jóvenes adquirir experiencia en diversos comportamientos que usarán de adultos. Al realizar estos actos de forma repetida en un contexto poco serio, el animal practica destrezas que más adelante serán importantes al cazar, huir o sostener interacciones sociales.

Investigaciones más recientes apoyan y extienden esta propuesta. El juego es más intenso al principio de la vida, cuando el cerebro está en pleno desarrollo y se están formando conexiones neuronales cruciales. John Byers, un zoólogo de la Universidad de Idaho, ha observado que los animales con encéfalo de mayor tamaño suelen ser más juguetones que los que tienen un encéfalo más pequeño. Puesto que un encéfalo más grande generalmente está asociado con una mayor capacidad de aprendizaje, esta relación apoya la idea de que las destrezas propias de la vida adulta se aprenden durante el juego juvenil. Si observamos cómo los niños forcejean bruscamente o juegan a la "roña", nos daremos cuenta de que el juego promueve la fuerza y la coordinación y permite desarrollar destrezas que podrían haber ayudado a nuestros antepasados cazadores a sobrevivir. El juego tranquilo con otros niños, con muñecas, cubos y otros juguetes, prepara a los pequeños para interactuar socialmente, criar a sus propios hijos y enfrentar el mundo físico.

Aunque Shakespeare nos dice que "el juego no necesita excusa", hay pruebas convincentes de que la tendencia a jugar ha evolucionado como un comportamiento adaptativo en animales capaces de aprender. Literalmente, el juego es ¡diversión en serio!

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO SEXO Y SIMETRÍA

En el experimento descrito al principio de este capítulo, las mujeres consideraron que los hombres con los cuerpos más simétricos eran los más atractivos. Pero, ¿cómo supieron cuáles hombres eran los más simétricos? Después de todo, la medición que los investigadores hicieron de la simetría de los sujetos se basaba en pequeñas diferencias en el tamaño de ciertas partes del cuerpo que las mujeres que fungieron como jueces ni siquiera vieron durante la prueba.

Quizá la simetría corporal de un hombre se refleja en la simetría facial y las mujeres prefieren los rostros simétricos. Para probar esta hipótesis, un grupo de investigadores utilizaron computadoras para alterar fotografías de rostros masculinos, ya sea para aumentar o disminuir su simetría (**FIGURA 25-31**). Luego, varias mujeres calificaron cada rostro por su grado de atractivo. Las observadoras mostraron una fuerte preferencia por los rostros más simétricos.

Algunas evidencias sugieren que las mujeres ni siquiera necesitan mirar a los hombres para determinar su simetría. En un estudio, los investigadores midieron la simetría corporal de 80 hombres y luego dieron una camiseta nueva a cada uno. Cada sujeto usó la camiseta para dormir durante dos noches consecutivas. Un grupo de 82 mujeres olieron las camisetas y calificaron los olores que

FIGURA 25-31 Rostros de simetría variable
Ciertos investigadores utilizaron un complejo software para modificar la simetría facial. De izquierda a derecha: un rostro modificado para tener menos simetría; el rostro original, sin modificación; un rostro modificado para ser más simétrico; un rostro perfectamente simétrico.

éstas expedían en función de su "agrado" y "atractivo". ¿Cuáles camisetas tenían los aromas más atractivos y agradables? Las que utilizaron los hombres más simétricos. Los investigadores concluyeron que las mujeres son capaces de identificar a los hombres simétricos por su olor.

¿Por qué las mujeres prefieren aparearse con hombres simétricos? La explicación más probable es que la simetría es un indicador de buena condición física. Las perturbaciones en el desarrollo embrionario normal pueden dar origen a cuerpos asimétricos, por lo que un cuerpo muy simétrico es un indicador de un desarrollo sano y normal. Las mujeres que se aparean con individuos cuyo cuerpo simétrico anuncia su salud y vitalidad podrían tener descendientes igualmente sanos y vitales.

Piensa en esto ¿Nuestra percepción de la belleza humana está determinada por pautas culturales o es parte de nuestra composición biológica, el producto de nuestra herencia evolutiva? ¿Qué evidencia te convencería de que la belleza es un fenómeno biológico, o bien, un fenómeno cultural?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

25.1 ¿En qué difieren los comportamientos innatos y los aprendidos?

Aunque en todos los comportamientos animales influyen factores tanto genéticos como ambientales, los biólogos distinguen entre los comportamientos cuyo desarrollo no depende en gran medida de factores externos y los que requieren estímulos más extensos del entorno para desarrollarse. Los comportamientos de la primera categoría se designan como innatos y pueden realizarse correctamente la primera vez que el animal se topa con el estímulo apropiado. Si un comportamiento cambia en respuesta a las aportaciones del entorno social y físico del animal, decimos que se aprende. El aprendizaje puede modificar comportamientos innatos para hacerlos más apropiados.

Aunque la distinción entre comportamiento innato y aprendido resulta útil desde el punto de vista conceptual, no es muy clara en los comportamientos naturales. El aprendizaje permite a los animales modificar esas respuestas innatas para que sólo se presenten con los estímulos apropiados. La impronta, una forma de aprendizaje con limitaciones innatas, es posible sólo durante cierta etapa en el desarrollo de un animal.

Web tutorial 25.1 Observación de un comportamiento: el sentido de orientación en las avispas excavadoras

25.2 ¿Cómo se comunican los animales?

La comunicación permite que animales de la misma especie interactúen eficazmente en su búsqueda de pareja, alimento, abrigo y otros recursos. Los animales se comunican mediante señales visuales, sonidos, sustancias químicas (feromonas) y el tacto. La comunicación visual es silenciosa y puede comunicar información que cambia rápidamente. Las señales visuales son activas (movimientos corporales) o pasivas (forma y color del cuerpo). La comunicación sonora también puede transmitir una amplia gama de información que cambia rápidamente y es eficaz en situaciones en las que es difícil usar el sentido de la vista. Es posible detectar las feromonas después de que el emisor se ha ido, transmitiendo un mensaje luego de un tiempo. El contacto físico refuerza los vínculos sociales y es parte del apareamiento.

25.3 ¿Cómo compiten los animales por recursos?

Aunque muchas interacciones competitivas se resuelven mediante agresión, las lesiones graves son poco comunes. Casi todos los encuentros agresivos consisten en exhibiciones que comunican la motivación, el tamaño y la fuerza de los combatientes.

Algunas especies establecen jerarquías de dominancia que reducen al mínimo la agresión. Con base en encuentros iniciales agresivos, cada animal adquiere un rango por el cual cede ante individuos dominantes y domina a los subordinados. Cuando los recursos son limitados, los animales dominantes obtienen una porción mayor y tienen mayores posibilidades de reproducirse.

La territorialidad, un comportamiento en el que los animales defienden áreas que contienen recursos importantes, también reduce al mínimo los encuentros agresivos. En general, las fronteras territoriales se respetan, y los individuos mejor adaptados defienden los territorios más ricos y producen el mayor número de descendientes.

25.4 ¿Cómo encuentran pareja los animales?

El éxito en la reproducción requiere que los animales reconozcan el sexo, la especie y la receptividad sexual de las parejas potenciales. En muchas especies, los animales también evalúan la calidad de sus posibles parejas. Estos requisitos han contribuido a la evolución de exhibiciones sexuales que utilizan todas las formas de comunicación posibles.

25.5 ¿Qué tipos de sociedades forman los animales?
La vida en sociedad tiene ventajas y desventajas, y las especies muestran amplias variaciones en el grado de cooperación de sus miembros. Algunas especies forman sociedades cooperativas. Las más rígidas y organizadas son las de los insectos sociales como las abejas, en las que los miembros desempeñan papeles rígidamente definidos durante toda su vida. Estos papeles se mantienen mediante programación genética y la influencia de ciertas feromonas. Las ratas topo desnudas exhiben las interacciones sociales más rígidas y complejas de los vertebrados, parecidas a las de los insectos sociales.

Web tutorial 25.2 La comunicación en las abejas

25.6 ¿La biología logra explicar el comportamiento humano?
El grado en que la genética influye en el comportamiento humano es un tema muy controvertido. Puesto que no es posible experimentar libremente con seres humanos, y como el aprendizaje desempeña un papel importante en casi todos los comportamientos humanos, los investigadores deben basarse en estudios realizados con recién nacidos, estudios culturales comparativos, correlaciones entre ciertos comportamientos y la fisiología (que sugieren la intervención de feromonas) y estudios de gemelos idénticos y fraternos. Cada vez hay más pruebas de que nuestra herencia genética desempeña un papel en la personalidad, la inteligencia, los gestos y los ademanes simples universales, nuestras respuestas a ciertos estímulos y nuestra tendencia a aprender cosas específicas, como el lenguaje, en ciertas etapas del desarrollo.

TÉRMINOS CLAVE

agresión *pág. 497*
altruismo *pág. 502*
aprendizaje *pág. 490*
aprendizaje por discernimiento *pág. 492*
aprendizaje por ensayo y error *pág. 491*
comportamiento *pág. 490*
comunicación *pág. 495*
condicionamiento operante *pág. 491*
danza ondulatoria *pág. 505*
etología *pág. 493*
feromona *pág. 496*
habituación *pág. 491*
impronta *pág. 493*
innato *pág. 490*
jerarquía de dominancia *pág. 498*
selección de linaje *pág. 503*
territorialidad *pág. 499*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Explica por qué ni el término "innato" ni el término "aprendido" describen satisfactoriamente el comportamiento de un organismo dado.
2. Explica por qué juegan los animales.
3. Menciona cuatro sentidos por los que los animales se comunican y da un ejemplo de una forma de comunicación basada en cada uno. Explica las ventajas y desventajas de cada forma de comunicación.
4. Un ave ignora a una ardilla en su territorio, pero actúa agresivamente hacia un miembro de su propia especie. Explica por qué.
5. ¿Por qué los encuentros agresivos entre miembros de la misma especie suelen ser relativamente inofensivos?
6. Comenta las ventajas y desventajas de vivir en grupo.
7. ¿En qué aspectos la sociedad de las ratas topo desnudas se parece a la de las abejas?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Los mosquitos macho se orientan hacia el agudo zumbido de la hembra, y las hembras (que son las únicas que chupan sangre) se sienten atraídas por el calor, la humedad y el dióxido de carbono que su presa emite. Utilizando esta información, diseña una trampa o un exterminador de mosquitos que aproveche los comportamientos innatos de esta especie. Ahora diseña uno para las polillas.
2. Eres neófito en la cría de abejas, así que no tienes experiencia en ello. En un intento por aumentar la producción de miel, introduces varias reinas en la colmena. ¿Qué es probable que suceda? ¿Qué podrías hacer para aumentar la producción?
3. Describe y da un ejemplo de jerarquía de dominancia. ¿Qué papel desempeña en el comportamiento social? Menciona un paralelismo en el ser humano y describe su papel en la sociedad humana. ¿Los dos papeles son similares? ¿Por qué? Repite este ejercicio para el comportamiento territorial en el ser humano y en otro animal.
4. Eres gerente de un aeropuerto. Los aviones corren peligro por el gran número de aves que vuelan en el área, pues los motores a reacción pueden succionarlas y averiarse. Sin perjudicar a las aves, ¿qué harías para evitar que aniden y vuelen cerca del aeropuerto y de los aviones?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

De Waal, F. "The End of Nature versus Nurture". *Scientific American,* diciembre de 1999. Un eminente etólogo propone adoptar un enfoque biológico con matices para comprender el comportamiento humano.

Lorenz, K. *King Solomon's Ring: New Light on Animal Ways.* Nueva York: Thomas Y. Crowell, 1952. Un libro bellamente escrito y lleno de interesantes anécdotas; aporta ideas importantes para los inicios de la etología.

Pinker, S. *The Language Instinct.* Nueva York: William Morrow, 1994. Una entretenida reseña de la comprensión actual de los lingüistas sobre cómo desarrollamos la capacidad de utilizar el lenguaje y cómo esa capacidad ha evolucionado.

Sherman, P. y Alcock, J. *Exploring Animal Behavior*. Sunderland, M. A: Sinauer, 1998. Una colección de artículos en los que biólogos del comportamiento describen sus investigaciones y conclusiones en torno a los mecanismos, las funciones y la evolución del comportamiento.

Weiner, J. *Time, Love, Memory: A Great Biologist and His Quest for the Origins of Behavior.* Nueva York: Knopf, 2000. Un escritor científico maravilloso relata la forma en que la genética estudia el comportamiento, especialmente el trabajo de un destacado pionero en el campo, Seymour Benzer.

Wheelwright, J. "Study the Clones First". *Discover*, agosto de 2004. Un informe de cómo los estudios con gemelos pueden ayudar a descubrir el componente genético del comportamiento humano.

CAPÍTULO

26 Crecimiento y regulación de las poblaciones

Una estatua de apariencia perpleja se asienta en un paisaje desolado en la Isla de Pascua. Si pudieran hablar, las estatuas de la Isla de Pascua nos contarían acerca de una población que sobrepasó la capacidad de su ambiente para sostenerla.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: El misterio de la Isla de Pascua

26.1 ¿Cómo cambian de tamaño las poblaciones?

El potencial biótico puede generar un crecimiento exponencial

26.2 ¿Cómo se regula el crecimiento de las poblaciones?

El crecimiento exponencial ocurre sólo en condiciones especiales

Investigación científica: Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores

La resistencia ambiental limita el crecimiento de las poblaciones

26.3 ¿Cómo se distribuyen las poblaciones en el espacio y en el tiempo?

Las poblaciones presentan diferentes distribuciones espaciales

Las poblaciones presentan tres modalidades básicas de supervivencia

26.4 ¿Cómo está cambiando la población humana?

Los demógrafos estudian los cambios en la población humana

La población humana continúa creciendo rápidamente

Los adelantos tecnológicos han incrementado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra

La transición demográfica ayuda a estabilizar a las poblaciones

Guardián de la Tierra: ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra?

El crecimiento demográfico se distribuye de manera desigual

La estructura de edades actual de una población predice su crecimiento futuro

En Europa la fertilidad está por debajo del nivel de reposición

La población de Estados Unidos crece rápidamente

Enlaces con la vida: Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua

ESTUDIO DE CASO EL MISTERIO DE LA ISLA DE PASCUA

¿POR QUÉ DESAPARECEN LAS CIVILIZACIONES? Entre quienes se han hecho esta pregunta estuvieron los primeros europeos en llegar a la Isla de Pascua en el siglo XVIII. Estos navegantes estaban sorprendidos por las enormes estatuas de piedra que dominan el paisaje baldío de la isla. Los pocos habitantes de la isla no tenían registros escritos ni recuerdos de los creadores de las estatuas, ni poseían la tecnología que habría sido necesaria para transportar y levantar esas enormes y pesadas estructuras. Mover tales objetos los 10 kilómetros desde la cantera más cercana y luego manipularlos en una posición vertical habría requerido largas cuerdas y vigas muy resistentes. Sin embargo, la Isla de Pascua estaba desprovista de todo lo que pudiera tener madera resistente o fibras para cuerda. No había árboles y ninguno de los escasos arbustos que ahí crecía medía más de 3 metros.

Una pista importante para el misterio de la Isla de Pascua la revelaron los científicos que estudiaron los granos de polen que encontraron en las capas de sedimentos antiguos. Como es posible determinar la edad de cada una de esas capas de sedimentos y como cada especie vegetal puede identificarse gracias a la apariencia única de su polen, el análisis de éste revela cómo la vegetación cambia con el paso del tiempo.

El registro del polen de la Isla de Pascua demostró que antes de la llegada de los seres humanos, la isla tenía bosque diversos, incluyendo árboles toromiro que hacen excelente leña, árboles hauhau que proporcionan fibras para cuerdas, y palmeras con troncos grandes y rectos que habrían fungido como rodillos para mover las estatuas. No obstante, en el siglo XV de nuestra era, cerca de mil años después de la llegada de los seres humanos, casi todos los árboles de la Isla de Pascua habían desaparecido. Algunos científicos suponen que las actividades de limpiar la tierra para la agricultura y de cortar árboles para obtener leña y materiales de construcción, durante mil años, destruyeron el bosque.

Aparentemente la cultura que erigió las estatuas desapareció junto con el bosque. ¿Podría haber alguna relación entre ambas desapariciones?

Con este capítulo se inicia nuestro estudio sobre la **ecología** (término que proviene de la palabra griega *oikos,* que significa "lugar para vivir" o "casa"). La ecología se refiere al estudio de las relaciones entre los seres vivos y su ambiente inanimado. El ambiente está integrado por un componente **abiótico** (inanimado), que incluye el suelo, el agua y el clima; y un componente **biótico** (vivo), que incluye todas las formas de vida. El término **ecosistema** se refiere tanto al ambiente inanimado, como a todos los organismos vivos que están presentes en una zona definida, como la isla que se describe en Estudio de caso de este capítulo. Dentro de un ecosistema, todas las poblaciones de organismos que interactúan forman la **comunidad**. En algún tiempo la Isla de Pascua albergó una comunidad floreciente de varias especies de árboles ahora extintas, así como arbustos y pastos, insectos, microorganismos y muchas especies de aves.

¿Qué es lo que impide que las poblaciones naturales crezcan excesivamente y mueran de hambre? ¿Qué ocurre cuando diferentes organismos compiten por el mismo tipo de alimento, por el espacio o por otros recursos? ¿Por qué la población humana continúa expandiéndose mientras otras fluctúan, permanecen estables o disminuyen? En este capítulo encontraremos respuestas a tales preguntas, a lo largo de nuestro estudio acerca del crecimiento de las poblaciones y de su control. En el resto de esta unidad veremos primero las *comunidades* y las interacciones que se dan en su interior, luego describiremos las leyes naturales que rigen el funcionamiento de los ecosistemas y exploraremos la diversidad de los ecosistemas que constituyen la *biosfera*, que abarca todas las formas de vida de la Tierra. Finalmente examinaremos la influencia del ser humano sobre la biosfera y nuestros intentos por conservar la biodiversidad.

26.1 ¿CÓMO CAMBIAN DE TAMAÑO LAS POBLACIONES?

Una **población** se compone de todos los miembros de una especie específica que viven dentro de un ecosistema. Por ejemplo, en la Isla de Pascua las palmeras, los árboles hauhau y los toromiru constituían una población diferente cada una.

Los estudios de los ecosistemas no alterados muestran que ciertas poblaciones tienden a conservar un tamaño relativamente estable al paso del tiempo, otras fluctúan de forma casi cíclica, y unas más varían esporádicamente en función de variables ambientales complejas. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de las especies no humanas, la población humana en conjunto ha experimentado un crecimiento sostenido durante siglos. Examinemos ahora cómo y por qué crecen las poblaciones, para después estudiar las fuerzas que controlan ese crecimiento.

Los factores que determinan si el tamaño de una población cambia y en qué magnitud son tres: **1.** los nacimientos, **2.** las muertes y **3.** la migración. Los organismos se incorporan a una población por nacimiento o por **inmigración** (migración hacia adentro), y la abandonan por muerte o por **emigración** (migración hacia afuera). Una población permanecerá estable si, en promedio, se integran a ella tantos individuos como los que la abandonan. Una población crece cuando el número de nacimientos, más el número de inmigrantes, sobrepasa el número de muertes más el número de emigrantes. La población disminuye cuando ocurre lo contrario. Una ecuación simple del cambio de tamaño de una población en un periodo específico es la siguiente:

(nacimientos − muertes) + (inmigrantes − emigrantes) = cambio en el tamaño de la población

En muchas poblaciones naturales los organismos que llegan o se van representan una contribución relativamente pequeña al cambio de la población; en consecuencia, los índices de natalidad y de mortalidad son los factores primordiales que influyen en su crecimiento. Por sencillez, entonces, omitiremos la inmigración y la emigración en cálculos futuros del cambio de la población.

El tamaño de cualquier población es el resultado de la interacción entre los dos principales factores opuestos que determinan los índices de natalidad y de mortalidad: el *potencial biótico* y la *resistencia ambiental*. El **potencial biótico** es el índice máximo al que la población podría crecer en las condiciones ideales, es decir, aquellas que hacen posible un índice de natalidad máximo y un índice de mortalidad mínimo. La **resistencia ambiental** se refiere a los límites al crecimiento de la población que los ambientes vivo e inanimado establecen; limita el crecimiento de la población y el tamaño definitivo de ésta incrementando las muertes y disminuyendo los nacimientos. Ejemplos de resistencia ambiental incluyen interacciones entre especies como la depredación y el parasitismo, así como la competencia que ocurre al interior de una especie y entre diferentes especies que usan los mismos recursos. La resistencia ambiental también abarca la disponibilidad siempre limitada de nutrimentos, energía y espacio; y los eventos naturales de breve duración como tormentas, incendios, heladas, inundaciones y sequías.

En la naturaleza, para los organismos longevos, la interacción entre el potencial biótico y la resistencia ambiental da por resultado un equilibrio entre el tamaño de la población y los recursos disponibles. Con la finalidad de entender cómo crecen las poblaciones y cómo se regula su tamaño, examinemos con detenimiento cada una de estas fuerzas.

El potencial biótico puede generar un crecimiento exponencial

El crecimiento de la población es una función de los índices de natalidad y de mortalidad, y del tamaño de la población

Con el paso del tiempo los cambios en el tamaño de las poblaciones dependen del índice de natalidad, del índice de mortalidad y del número de individuos que integran la población original. El **índice de natalidad** (n) y el **índice de mortalidad** (m) a menudo se expresan como el número de nacimientos (o muertes) por individuo durante una unidad específica de tiempo, como un mes o un año.

El **índice de crecimiento** (c) de una población es una medición del cambio de tamaño de la población por individuo y por unidad de tiempo. Este valor se determina restando el índice de mortalidad (m) del índice de natalidad (n):

n	−	***m***	=	***c***
(índice de natalidad)	−	**(índice de mortalidad)**	=	**(índice de crecimiento)**

Si el índice de mortalidad es mayor que el de natalidad, el índice de crecimiento será negativo y la población disminuirá.

Para calcular el índice de crecimiento anual de una población humana de 1000, donde se producen 150 nacimientos y 50 muertes cada año, utilizamos esta sencilla ecuación:

c =	**0.15**	−	**0.05**	=	**0.1 o 10 por**
(índice de crecimiento)	**(índice de natalidad)**		**(índice de mortalidad)**		**ciento por año**

Para calcular el número de individuos que se integran a una población en un periodo determinado (C), el índice de crecimiento (c) se multiplica por el tamaño de la población original (N):

C	=	***c***	×	***N***
(crecimiento de la población por unidad de tiempo)		**(índice de crecimiento)**		**(tamaño de la población)**

En este ejemplo, el crecimiento de población (cN) es igual a $0.1 \times 1000 = 100$ individuos en el primer año. Si este índice de crecimiento es constante, entonces, al año siguiente el tamaño de la población (N) empezará en 1100, y 110 (cN) nuevos individuos se integrarán a la población. Durante el tercer año se incorporarán 121 nuevos individuos, y así sucesivamente.

Esta modalidad de aumento continuamente acelerado del tamaño de población es un **crecimiento exponencial**, durante el cual la población (a lo largo de un periodo determinado) crece en un porcentaje fijo del tamaño que tiene al comenzar ese periodo. Por consiguiente, se agrega a la población un número creciente de individuos durante cada periodo sucesivo, con lo cual el tamaño de la población crece a un ritmo siempre acelerado. La gráfica del crecimiento exponencial de población suele designarse como una **curva en forma de J**. El crecimiento exponencial de la población se da siempre que el número de nacimientos excede sistemáticamente al de muertes. Esto sucede cuando, en promedio, durante su vida cada individuo produce más de un descendiente que sobrevive. Aunque el número de descendientes que un individuo produce cada año varía desde millones (como en el caso de una ostra) hasta uno o menos (en el caso del ser humano), cada organismo —ya sea por sí solo o como parte de una pareja que se reproduce sexualmente— tiene el potencial de reponerse a sí mismo muchas veces durante su vida. Este enorme potencial biótico ha evolucionado porque contribuye a asegurar que, en un mundo repleto de fuerzas de resistencia ambiental, algún descendiente sobreviva hasta tener su propia descendencia. Entre los diversos factores que influyen en el potencial biótico están los siguientes:

- La edad a la que el organismo se reproduce por primera vez
- La frecuencia con que ocurre la reproducción
- El número promedio de descendientes que se producen cada vez
- La duración del lapso reproductivo en la vida del organismo
- El índice de mortalidad de los individuos en condiciones ideales

Ilustraremos el concepto de crecimiento exponencial mediante algunos ejemplos, en los cuales difieren esos factores. Normalmente la bacteria *Staphylococcus* (FIGURA 26-1a) es un habitante inofensivo del interior y del exterior del cuerpo humano, donde el crecimiento de su población está limitado por la resistencia ambiental. Sin embargo, en un medio de cultivo ideal, por ejemplo, en natillas tibias, donde el *Staphylococcus* dividiría cada 20 minutos y la población se duplicaría cada 20 minutos (tres veces por hora), provocando así la amenaza de intoxicación por alimentos. Cuanto más crezca la población, mayor será el número de células capaces de dividirse. El potencial reproductivo de las bacterias es tan grande que, hipotéticamente, los descendientes de una sola bacteria cubrirían la Tierra con una capa de más de dos metros de altura ¡en tan sólo 48 horas!

En cambio, el águila dorada es una especie de vida relativamente larga y de reproducción muy lenta (FIGURA 26-1b). Supongamos que el águila dorada llegara a vivir 30 años, que alcanzara la madurez sexual a los 4 años de edad, y que cada pareja de águilas tuviera dos crías cada año durante los 26 años restantes (línea roja). En la figura 26-1 se compara el crecimiento potencial en la población de las águilas con el de bacterias, suponiendo que no hay muertes en ninguna de las dos poblaciones durante el tiempo graficado. Aunque la escala de tiempo es muy diferente, advierte que la forma de las gráficas es prácticamente idéntica: ambas poblaciones presentan la curva en forma de J característica del crecimiento exponencial. La figura 26-1b muestra además lo que ocurre si la reproducción de las águilas se iniciara a la edad de 6 años (línea verde) en vez de a los 4. El crecimiento sigue siendo exponencial, aunque el tiempo necesario para alcanzar un tamaño específico aumenta considerablemente. Este resultado tiene implicaciones importantes para la población humana: una maternidad más tardía retrasa significativamente el crecimiento de la población. Si cada mujer tuviera tres hijos antes de cumplir los 20 años, la población crecería mucho más rápidamente, que si cada mujer tuviera cinco hijos pero comenzara a tenerlos a los 30 años de edad.

Hasta aquí, hemos examinado el crecimiento de la población únicamente considerando los índices de natalidad. Sin embargo, incluso en condiciones ideales las muertes son inevitables, y el potencial biótico toma en cuenta índices de mortalidad mínimos. En la FIGURA 26-2 se comparan tres poblaciones bacterianas hipotéticas que sufren diferentes índices de mortalidad. Advierte que las tres curvas tienen la misma forma: siempre que los nacimientos superan las muertes, la población se aproxima en un momento dado a un tamaño infinito; pero un mayor índice de mortalidad incrementa el tiempo necesario para alcanzar un tamaño de población específico.

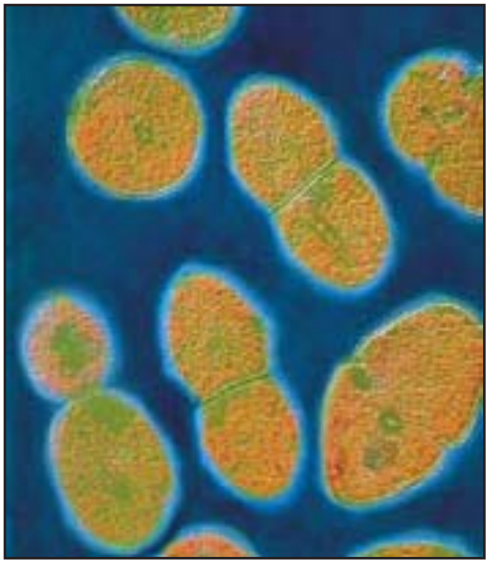
26.2 ¿CÓMO SE REGULA EL CRECIMIENTO DE LAS POBLACIONES?

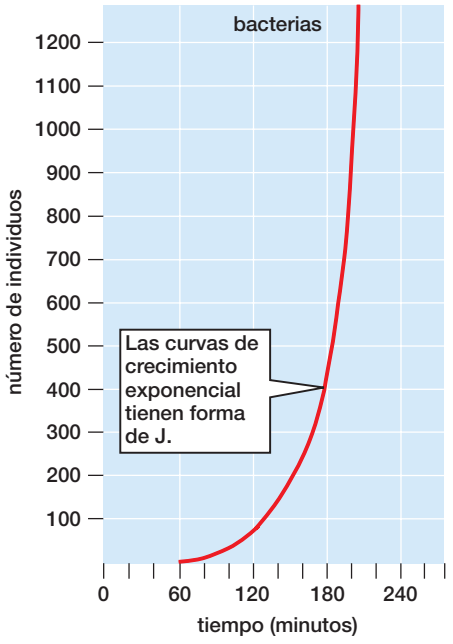
El crecimiento exponencial ocurre sólo en condiciones especiales

En 1859 Charles Darwin escribió: "No hay excepción a la regla de que naturalmente todos los seres orgánicos se incrementan a un índice tan alto que, si no se destruyen, la Tierra pronto estaría cubierta por la descendencia de una sola pareja". No obstante, en la naturaleza, el crecimiento exponencial ocurre únicamente en circunstancias especiales y por un tiempo limitado.

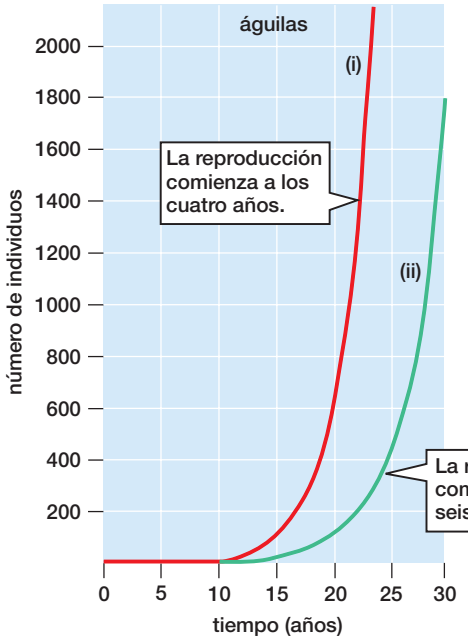
Las poblaciones que sufren ciclos de auge y decadencia muestran crecimiento exponencial

El crecimiento exponencial en las poblaciones que sufren ciclos regulares, donde un crecimiento rápido de la población





tiempo (minutos)	número de bacterias
0	1
20	2
40	4
60	8
80	16
100	32
120	64
140	128
160	256
180	512
200	1024
220	2048



tiempo (años)	número de águilas (i)	número de águilas (ii)
0	2	2
2	2	2
4	4	2
6	8	4
8	14	8
10	28	12
12	52	18
14	100	32
16	190	54
18	362	86
20	630	142
22	1314	238
24	2504	392
26	4770	644
28	9088	1066
30	17314	1764

FIGURA 26-1 Curvas en forma de J del crecimiento exponencial
Todas las curvas de este tipo tienen la misma forma de J; la diferencia principal es la escala de tiempo. ***a)*** Crecimiento de una población de bacterias a partir de un solo individuo y con un tiempo de duplicación de 20 minutos. ***b)*** Crecimiento de una población de águilas, a partir de un solo par de crías, con edades de primera reproducción de 4 años (línea roja) y de 6 años (línea verde). Advierte en la tabla que, al cabo de 26 años, la población de águilas que comenzó a reproducirse a los 4 años es casi siete veces más grande que la de águilas que comenzaron a reproducirse a los seis años.

va seguido de una mortandad masiva repentina. Estos **ciclos de auge y decadencia** suceden en diversos organismos por razones variadas y complejas. Muchas especies de vida corta y reproducción rápida —desde algas hasta insectos— tienen ciclos de población estacionales que están ligados a cambios predecibles en la precipitación pluvial, temperatura o disponibilidad de nutrimentos (**FIGURA 26-3**). En los climas templados, las poblaciones de insectos crecen con rapidez durante la primavera y el verano, y luego decaen bruscamente con las severas y mortíferas heladas del invierno. Factores más complejos dan origen a ciclos de aproximadamente cuatro años en el caso de pequeños roedores, como el ratón campestre y el lemming, y ciclos de población mucho más largos en la liebre, la rata almizclera y el urogallo.

Las poblaciones de lemmings, por ejemplo, pueden crecer hasta que los roedores consumen en exceso su frágil ecosiste-

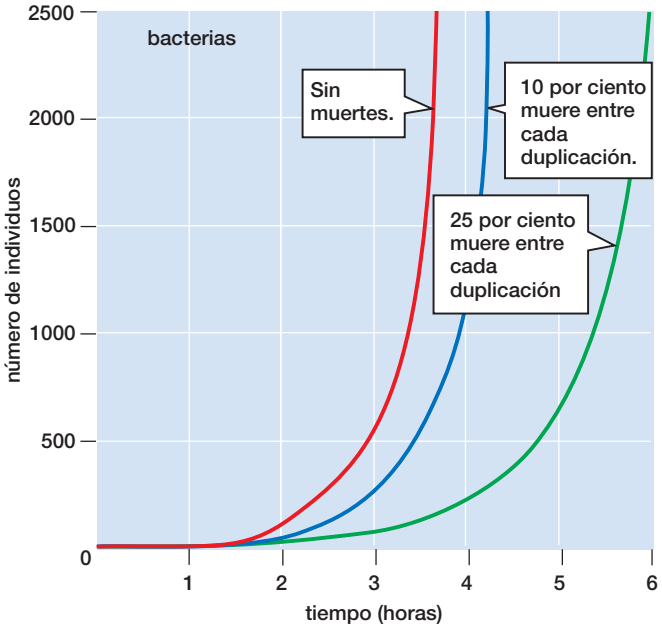


FIGURA 26-2 efecto de los índices de mortalidad en el crecimiento de las poblaciones
Las gráficas suponen que una población bacteriana se duplica cada 20 minutos. Advierte que la población en la que una cuarta parte de las bacterias mueren cada 20 minutos llega a ser de 2500, tan sólo 2 horas y 20 minutos después de la población en que no hay fallecimientos. PREGUNTA: ¿Cómo necesitaría ser el índice de mortalidad para que se estabilizaran estas poblaciones?

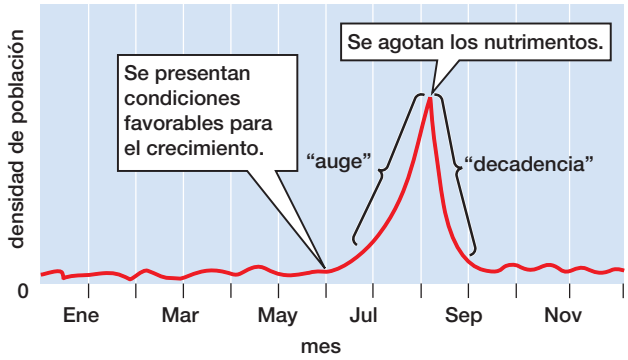


FIGURA 26-3 Ciclo de población de auge y decadencia
Densidad de población de cianobacterias (algas verdiazules) durante un ciclo anual de auge y decadencia en un lago. Las algas sobreviven a un nivel bajo a lo largo del otoño, el invierno y la primavera. A inicios de julio las condiciones se tornan favorables para el crecimiento y se produce un crecimiento exponencial hasta terminar agosto. Los nutrimentos se agotan pronto y la población decae rápidamente.

ma de tundra ártica. La falta de alimento, las crecientes poblaciones de depredadores y la tensión social provocada por la sobrepoblación, pueden favorecer una elevada y súbita mortalidad. Se producen numerosas muertes cuando los lemmings emigran en oleadas desde regiones de alta densidad de población. Durante esos drásticos desplazamientos en masa, los lemmings son presa fácil de los depredadores. Muchos se ahogan pues comienzan a nadar cuando se topan con una masa de agua, incluso el mar, pero no consiguen cruzar hasta el otro lado. A la postre la menguada población de lemmings causa una reducción en el número de depredadores (véase la sección "Investigación científica: Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores") y una recuperación en la comunidad vegetal que normalmente serviría de alimento a los lemmings. Estas respuestas, a la vez, preparan el escenario para una nueva ronda de crecimiento exponencial de la población de lemmings (FIGURA 26-4).

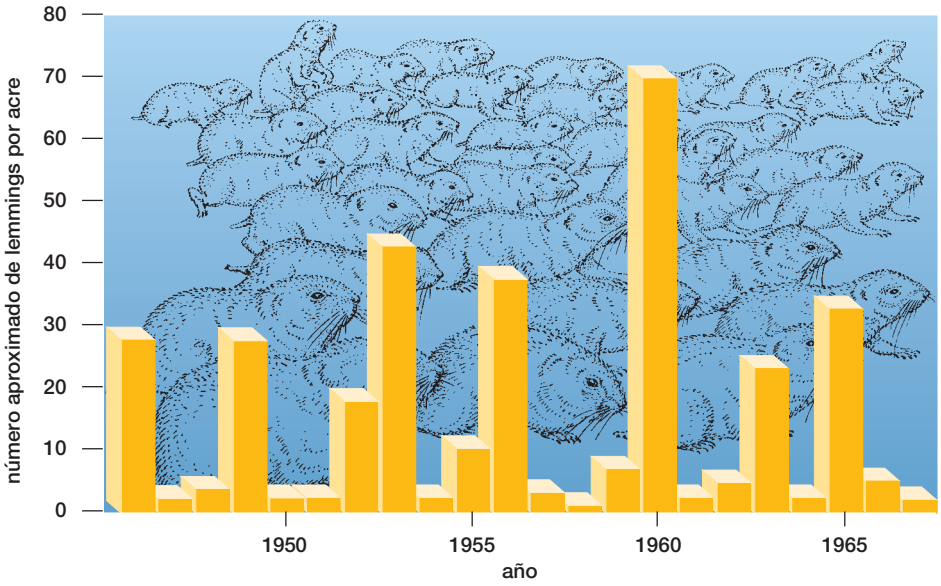


FIGURA 26-4 Ciclos de población de los lemmings seguidos por patrones de auge y decadencia
La densidad de población de los lemmings sigue aproximadamente un ciclo de cuatro años (datos de Point Barrow, Alaska). PREGUNTA: ¿Qué factores harían que los datos en esta gráfica fueran algo erráticos e irregulares?

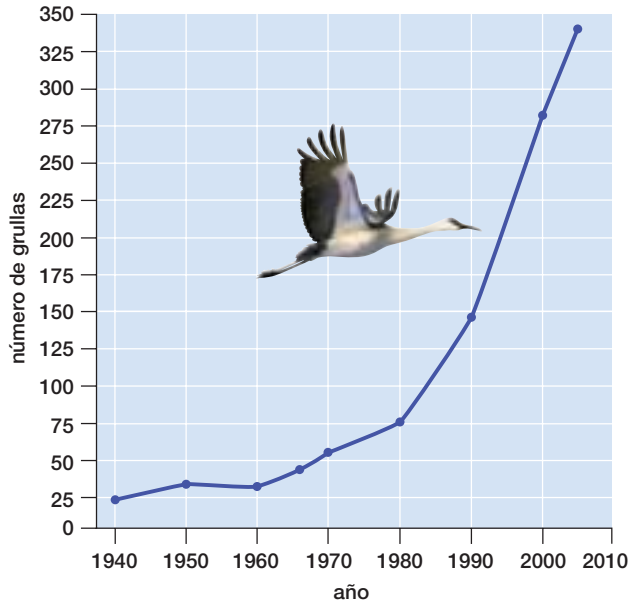


FIGURA 26-5 Crecimiento exponencial de grullas americanas salvajes
La caza y la destrucción del hábitat redujo la población mundial de la grulla americana a casi 20 ejemplares, hasta antes de que se le protegiera en 1940. Su población salvaje aumentó a 340 individuos para 2005. Observa la curva J característica del crecimiento exponencial.

El crecimiento exponencial sucede cuando los organismos invaden nuevos hábitat favorables

En las poblaciones que no presentan ciclos de auge y decadencia, puede haber temporalmente un crecimiento exponencial en circunstancias especiales; por ejemplo, si se incrementa el suministro de alimentos o si se eliminan factores reguladores de la población, como depredadores o cazadores humanos. Por ejemplo, la población de grulla americana se ha incrementado exponencialmente desde que se decretó su protección de la caza y la perturbación humana en 1940 (FIGURA 26-5). También hay crecimiento exponencial cuando los individuos invaden un nuevo hábitat donde las condiciones son favorables y no hay mucha competencia, como un predio agrícola que se ara y luego se abandona, que ofrece un hábitat ideal para plantas oportunistas anuales y pastos perennes, cuyas poblaciones podrían incrementarse inicialmente de manera exponencial. Las **especies invasoras** estabilizarse o decaer rápida y drásticamente, en un suceso que se conoce como "caída de la población".

La resistencia ambiental limita el crecimiento de las poblaciones

Imagina un plato de cultivo estéril donde los nutrimentos se reabastecen de manera constante y los residuos se eliminan. Si se le agregara un pequeño número de células epidérmicas vivas, éstas se irían al fondo y empezarían a reproducirse mediante división celular mitótica. Si todos los días contaras las células usando un microscopio y elaboraras una gráfica con esos números, en un momento tu gráfica se parecería a la curva en forma de J característica del crecimiento exponencial. No obstante, conforme las células empezaran a ocupar todo el espacio disponible en el plato, su índice de reproducción se haría más lento y al final caería a cero, lo cual haría que el tamaño de la población permaneciera constante.

El crecimiento logístico sucede cuando las poblaciones nuevas se estabilizan como resultado de la resistencia ambiental

Tu gráfica del número de células epidérmicas ahora se asemejará a la de la FIGURA 26-6a. Este patrón de crecimiento, que se conoce como **crecimiento demográfico logístico**, es característico de poblaciones que crecen hasta el número máximo que su ambiente puede mantener y, por lo tanto, estabilizar.

La curva que resulta cuando se grafica el crecimiento logístico en ocasiones se denomina **curva S** por su forma general. La fórmula matemática que produce una curva de crecimiento logístico consiste en la fórmula para el crecimiento exponencial ($C = cN$) multiplicada por un factor que impone límites a tal crecimiento. En el caso de las poblaciones reales, dichos límites son impuestos por el ambiente. La *fórmula logística* incluye una variable (K) que se describe como la *capacidad de carga o sostenimiento* del ecosistema. La **capacidad de carga o sostenimiento** (K) es el tamaño máximo de la población que puede sustentar un ecosistema durante un periodo específico sin que se dañe el ecosistema. La ecuación de la curva S para el crecimiento demográfico logístico es

$$C = cN[(K - N)/K]$$

Para comprender este nuevo multiplicador $[(K - N)/K]$, empecemos con $(K - N)$. Cuando restamos la población actual (N) de la capacidad de carga (K), obtenemos el número de individuos que pueden agregarse todavía a la población actual. Ahora bien, si dividimos este nuevo número entre K, obtenemos la fracción de la capacidad de carga que aún puede agregarse a la población actual, antes de que se detenga su crecimiento ($C = 0$). Como se observa, cuando N es muy pequeña, $(K - N)/K$ se aproxima a 1, y parece que la ecuación es como la del crecimiento exponencial. Esto produce la porción inicial de la curva S, la cual se parece a una curva J. No obstante, conforme N aumenta con el paso del tiempo, $K - N$ se aproximará a cero. El índice de crecimiento se hará más lento y la porción muy creciente de la curva J inicial empezará a estabilizarse. Cuando el tamaño de la población (N) es igual a la capacidad de carga (K), se termina el crecimiento demográfico ($C = 0$), como ocurre en la porción final de la curva S (figura 26-6a).

Aunque la matemática de la ecuación logística no permitirá esto, por su naturaleza, un incremento en N sobre K podría

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores

Si suponemos que ciertas especies de presas sirven de alimento exclusivamente a un depredador específico, parecería lógico pensar que ambas poblaciones podrían presentar cambios cíclicos, donde los cambios en el tamaño de la población de depredadores se retrasan respecto a los cambios en el tamaño de la población de presas. Por ejemplo, una población grande de liebres proporcionaría alimento en abundancia a los linces y a sus crías, que en tal caso sobrevivirían en gran número. Una mayor población de linces comería más liebres, lo cual reduciría la población de éstas. Con menos presas, menos linces sobrevivirían y se reproducirían, de manera que la población de linces disminuiría poco tiempo después.

¿Se da efectivamente en la naturaleza este ciclo desfasado de poblaciones de depredadores y presas? Un ejemplo clásico de este tipo de ciclo se demostró utilizando el ingenioso método de contar todas las pieles de lince del norte de Canadá y de liebre americana adquiridas de los tramperos por la Hudson Bay Company entre 1845 y 1935. La disponibilidad de pieles (que supuestamente refleja el tamaño de las poblaciones) mostró ciclos de población sorprendentes y estrechamente ligados de estos depredadores y sus presas (**FIGURA E26-1**). Por desgracia, muchas variables no controladas pudieron haber influido en la relación entre los linces y las liebres. Por ejemplo, a veces las poblaciones de liebres fluctúan incluso sin la presencia de linces, posiblemente porque en ausencia de depredadores las liebres sobrepasan su capacidad de carga y reducen su abasto de alimento. Además, los linces no se alimentan exclusivamente de liebres, pues comen también otros mamíferos pequeños. Variables ambientales independientes de la densidad como los inviernos excepcionalmente crudos, por ejemplo, quizá también hayan tenido efectos adversos en ambas poblaciones y producido ciclos similares. Hace poco tiempo, unos investigadores pusieron a prueba con mayor rigor la relación liebre-depredador, cercando zonas de 1 kilómetro cuadrado del norte de Canadá. La población de liebres se incrementó por un factor de 2 cuando hubo mayor abasto de alimento, por un factor de 3 cuando se excluyeron los depredadores, y por un factor de 11 cuando se aumentó el alimento y se excluyeron los depredadores. Esto sugiere que tanto la disponibilidad de alimento como la depredación contribuyen con el ciclo natural de auge y decadencia en las liebres.

Con la finalidad de poner a prueba la hipótesis del ciclo de depredador y presa de una forma más controlada aún, los investigadores recurrieron a estudios de laboratorio sobre poblaciones de depredadores pequeños y sus presas. En el estudio que se ilustra en la **FIGURA E26-2** se incluyeron una avispa bracónida como depredador, y su presa el gorgojo del frijol. Se le proporcionó alimento abundante a los gorgojos, a las avispas no se les suministró algún otro alimento y las demás variables se mantuvieron cuidadosamente controladas. De conformidad con lo previsto, las dos poblaciones presentaron ciclos regulares, en los cuales la población de depredadores aumentaba y disminuía un poco más tarde, que la población de presas. Las avispas depositan sus huevecillos en las larvas del gorgojo, las cuales sirven de alimento a las avispas recién nacidas. Una población grande de gorgojos asegura un alto índice de supervivencia a las crías de avispa, de manera que aumenta la población del depredador. Después, bajo la intensa presión por el efecto del comportamiento depredador, la población del gorgojo disminuye bruscamente y se reduce la disponibilidad de alimento y, por consiguiente, el tamaño de la población de la siguiente generación de avispas. La menor abundancia de depredadores permite entonces que la población de gorgojos aumente con rapidez, y así sucesivamente.

Es muy poco probable que en la naturaleza se encuentre alguna vez un ejemplo tan claro, aunque es evidente que este tipo de interacción entre depredador y presa contribuye a las fluctuaciones que se observan en muchas poblaciones naturales.

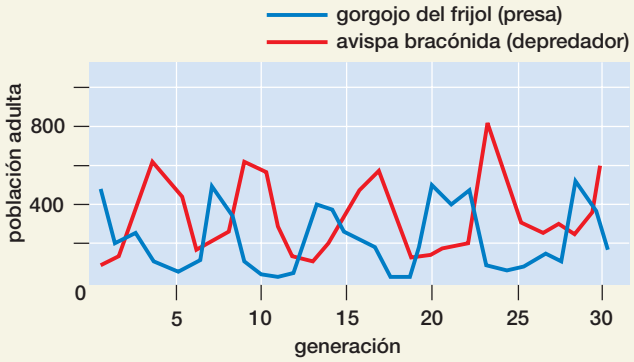


FIGURA E26-2 Ciclos experimentales de depredadores y presas
Fluctuaciones desfasadas de las poblaciones en laboratorio del gorgojo del frijol y de la avispa bracónida que es su depredador.

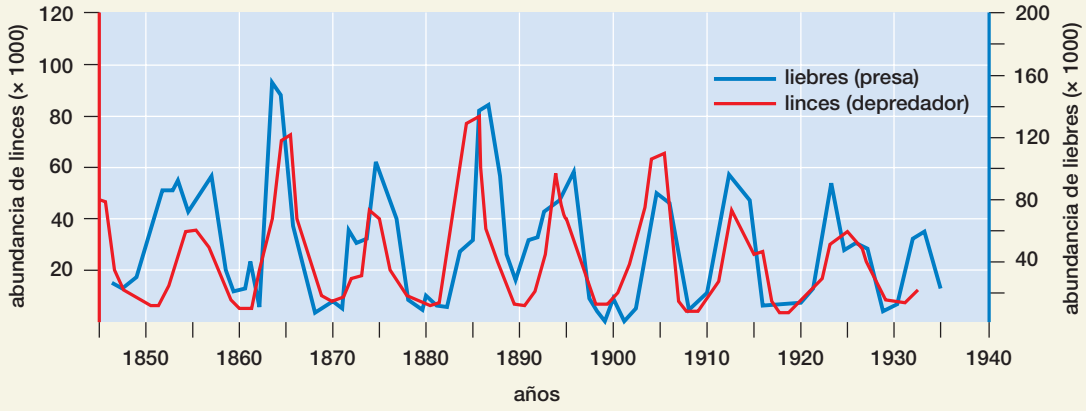
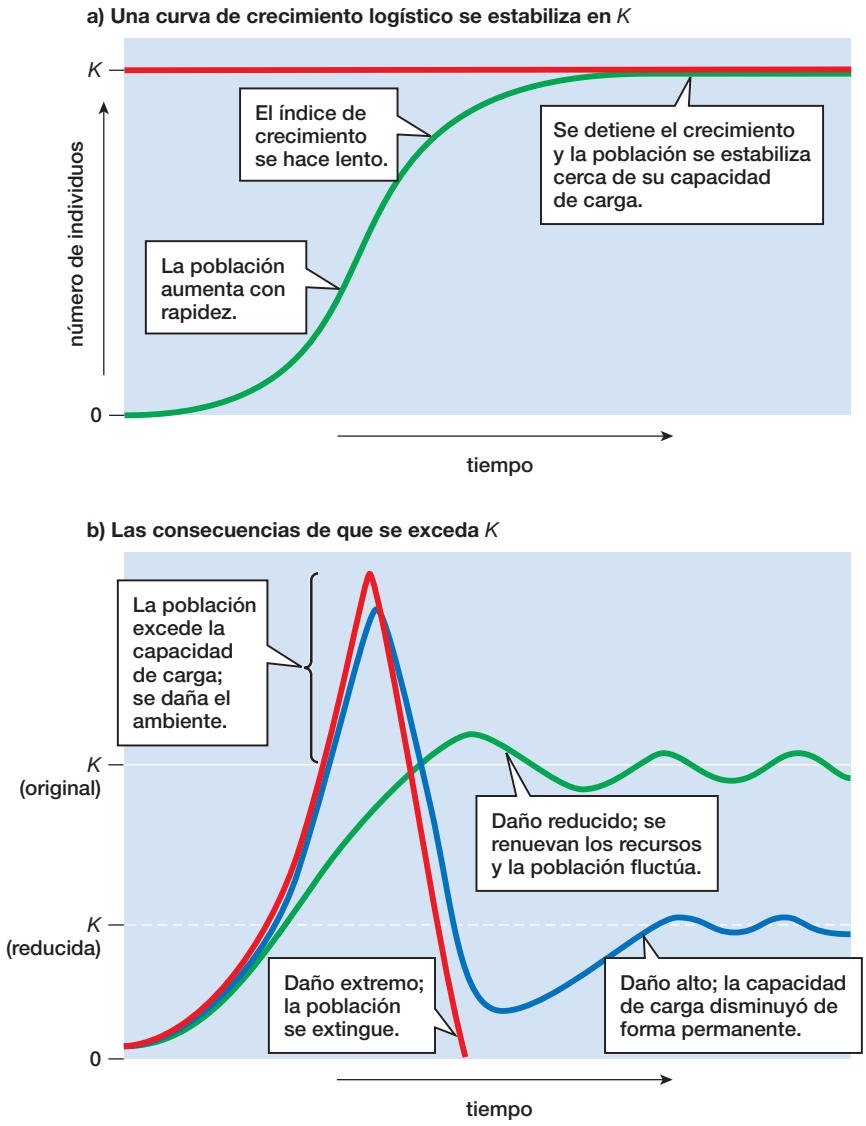


FIGURA E26-1 Ciclos de población de depredadores y presas
Aquí se han graficado las liebres americanas y los linces que se alimentan de ellas, sobre la base del número de pieles recibidas por la Hudson Bay Company.

FIGURA 26-6 La curva S del crecimiento demográfico logístico

Durante el crecimiento logístico, la población permanecerá reducida por algún tiempo, y luego se expandirá cada vez más rápido. Después, el índice de crecimiento se vuelve más lento y al final el crecimiento se detiene en el punto de la capacidad de carga (*K*) o muy cerca de éste. ***b***) El resultado es una curva con forma de "s suelta". En la naturaleza las poblaciones pueden sobrepasar la capacidad de carga (*K*), pero sólo durante un tiempo limitado. Se ilustran los tres resultados posibles.


a) Una curva de crecimiento logístico se estabiliza en K
K
número de individuos
0
El índice de crecimiento se hace lento.
Se detiene el crecimiento y la población se estabiliza cerca de su capacidad de carga.
La población aumenta con rapidez.
tiempo
b) Las consecuencias de que se exceda K
La población excede la capacidad de carga; se daña el ambiente.
K (original)
Daño reducido; se renuevan los recursos y la población fluctúa.
K (reducida)
Daño extremo; la población se extingue.
Daño alto; la capacidad de carga disminuyó de forma permanente.
0
tiempo

mantenerse durante un corto tiempo. Esto, sin embargo, es riesgoso porque una población encima de *K* viviría a expensas de los recursos que no pueden renovarse tan rápido como se agotan. Es probable que un pequeño incremento sobre *K* vaya seguido por un decremento en *N*, hasta que los recursos se recuperen y se restaure el nivel original de *K*. No obstante, tal vez esto no haya ocurrido en la Isla de Pascua.

Si la población excede por mucho la capacidad de carga de su ambiente, las consecuencias son más drásticas porque la demanda excesiva diezma los recursos esenciales; esto puede reducir *K* permanente y drásticamente, originando así que la población disminuya a una fracción de su tamaño anterior o que desaparezca por completo (FIGURA 26-6b

exuberante selva de la Isla de Pascua es un ejemplo dramático de lo que sucedería si el exceso de población elimina los recursos fundamentales (como los árboles), reduciendo permanente y drásticamente la capacidad de la isla para mantener gente y condenando a muchas de sus poblaciones naturales a la extinción. Las islas son especialmente vulnerables a acontecimientos drásticos como ésos, en parte porque sus poblaciones son incapaces de emigrar. Sin embargo, considerando la expansión de la raza humana, la Tierra es una isla.

El crecimiento demográfico logístico ocurre de manera natural cuando una especie se desplaza hacia un nuevo hábitat, como lo documentó el ecologista John Connell con los percebes que contó cuando éstos colonizaron las regiones rocosas costeras (FIGURA 26-8

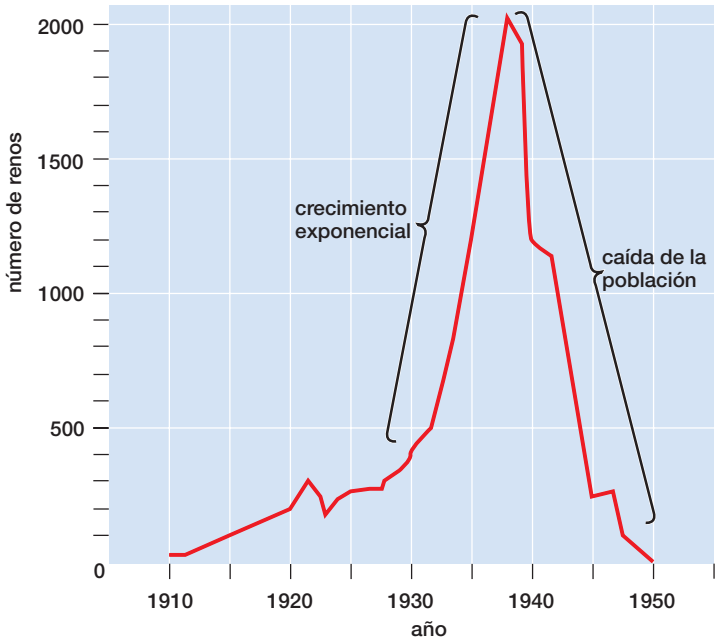


FIGURA 26-7 Efectos de exceder la capacidad de carga
Exceder la capacidad de carga puede dañar el ecosistema y reducir su capacidad para brindar sustento a la población. En 1911 se introdujeron 25 renos en una de las islas Pribilof (St. Paul) del mar de Bering cerca de Alaska. El alimento era abundante y los renos no encontraron depredadores en la isla. La manada creció exponencialmente (nota la forma de J inicial) hasta llegar a 2000 renos en 1936. En este punto, la pequeña isla sufría de pastoreo excesivo, el alimento escaseaba y la población disminuyó espectacularmente. Ya para 1950 sólo quedaban ocho renos con vida.

el índice de mortalidad de los descendientes. Conforme se incrementa la resistencia ambiental, el crecimiento demográfico se hace más lento y a la postre se detiene. Las condiciones naturales nunca son estables por completo, de manera que tanto *K* como el tamaño de la población tendrán cierta variación de un año a otro.

En la naturaleza, a la postre la resistencia ambiental mantiene las poblaciones en la capacidad de carga de su ambien-

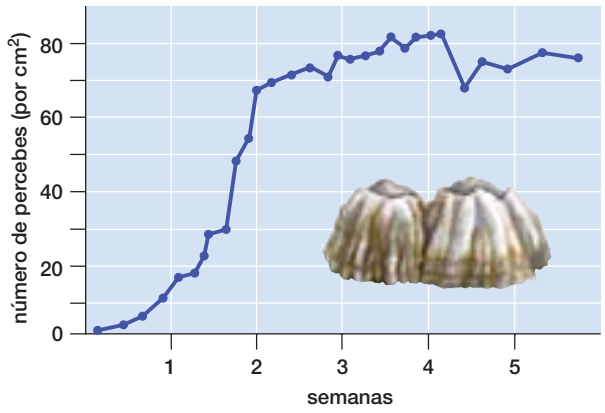


FIGURA 26-8 Una curva logística en la naturaleza
Los percebes son crustáceos cuyas larvas son transportadas por las corrientes oceánicas hacia las costas rocosas, donde se establecen y luego se adhieren de forma permanente a las rocas y crecen como adultos con forma de concha. En la roca desnuda, el número de larvas que se establecen produce una curva de crecimiento logístico cuando la competencia por el espacio limita su densidad poblacional. *Fuente*: Basada en datos de J. H. Connell, *Ecological Monographs*

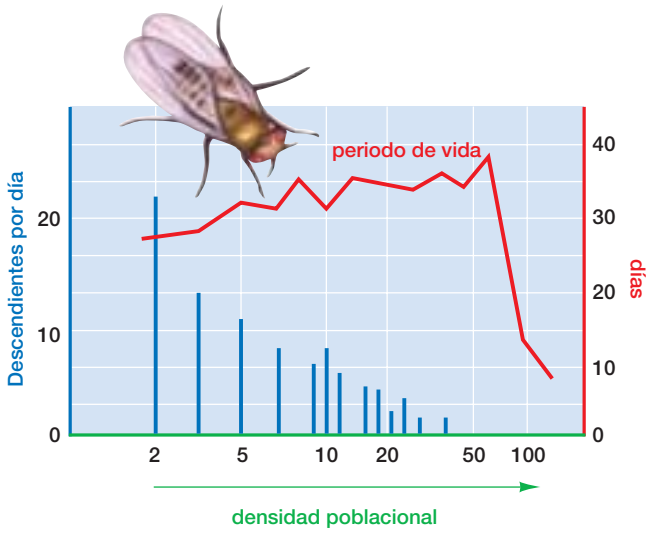


FIGURA 26-9 Resistencia ambiental dependiente de la densidad
En respuesta a la aglomeración, las poblaciones de mosca de la fruta en el laboratorio presentan una disminución tanto en el índice reproductivo como en el periodo de vida. En esta gráfica, la densidad poblacional (eje horizontal) aumenta de izquierda a derecha. Observa que el número de descendientes que se produce por día disminuye conforme se incrementa la densidad poblacional. El periodo de vida permanece relativamente constante hasta que la densidad poblacional alcanza un nivel crítico, ocasionando así que el periodo de vida se desplome drásticamente. *Fuente*: Basada en datos de R. Pearl, J. R. Miner y S. L. Parker, *American Naturalist*

te o por debajo de ella. Los factores como la resistencia ambiental se clasifican en dos grandes categorías. Los factores **independientes de la densidad** limitan el tamaño de población cualquiera que sea la densidad de población (número de individuos por unidad de área). Los factores **dependientes de la densidad** son más eficaces a medida que la densidad de población aumenta. Observa que los nutrimentos, la energía y el espacio (los principales determinantes de la capacidad de carga) son todos reguladores del tamaño de la población dependientes de la densidad. En los siguientes apartados examinaremos con mayor detenimiento estos factores y la manera en que regulan el crecimiento de las poblaciones.

Los factores independientes de la densidad limitan las poblaciones cualquiera que sea su densidad

Quizá el factor natural independiente de la densidad más importante sea el clima. Los sucesos naturales, como huracanes, sequías, inundaciones e incendios, tienen efectos profundos en las poblaciones locales, en especial sobre aquellas especies pequeñas y de vida corta, independientemente de la densidad de población. El tamaño de muchas poblaciones de insectos y de plantas anuales está limitado por el número de individuos que nacen antes de la primera helada severa. Por lo regular, las poblaciones de este tipo no alcanzan la capacidad de carga de su ambiente, porque los factores independientes de la densidad intervienen antes de que ello ocurra. El clima es el generador principal de los ciclos de población de auge y decadencia antes descritos, y también puede ocasionar variaciones significativas en las poblaciones naturales de un año a otro.

Los organismos que viven durante varios años han perfeccionado diversos mecanismos que compensan los cambios estacionales, para así burlar esta forma de regulación de la población independiente de la densidad. Por ejemplo, muchos mamíferos desarrollan pieles gruesas y almacenan grasa para el invierno; algunos también hibernan. Otros animales, entre ellos muchas aves, emigran a grandes distancias para encontrar alimento y un clima generoso. Muchos árboles y arbustos consiguen sobrevivir a los rigores del invierno entrando en un periodo de latencia, perdiendo sus hojas y reduciendo drásticamente sus actividades metabólicas.

También las actividades humanas limitan el crecimiento de las poblaciones naturales de formas que son independientes de la densidad de población. Los plaguicidas y contaminantes provocan formidables reducciones de las poblaciones naturales. Antes de que en Estados Unidos se prohibiera en la década de 1970, el plaguicida DDT redujo significativamente las poblaciones de aves depredadoras, como águilas americanas, águilas pescadoras y pelícanos. Diversos contaminantes continuaron dañando la vida salvaje, como veremos en el capítulo 28. La caza excesiva por parte de los seres humanos ha orillado a especies animales completas hacia la extinción, como por ejemplo la una vez abundante paloma del pasajero y la colorida cacatúa de Carolina.

La eficacia de los factores dependientes de la densidad aumenta conforme se incrementa la densidad de población

En el caso de las especies longevas, por mucho los elementos más importantes de resistencia ambiental son los factores dependientes de la densidad. Debido a que su eficacia aumenta a medida que la densidad de población crece, los factores dependientes de la densidad ejercen un efecto de retroalimentación negativa en el tamaño de las poblaciones. Los factores dependientes de la densidad incluyen las interacciones con la comunidad, como el comportamiento depredatorio y el parasitismo, así como la competencia dentro de la especie o con miembros de otras especies. Estos factores se analizan a continuación y en el capítulo 27.

Los depredadores a menudo ejercen controles sobre la abundancia de las presas

Tanto en el *comportamiento depredatorio* como en el *parasitismo,* un organismo se alimenta de otro y lo daña al hacerlo. Aunque la distinción no es lo suficientemente clara, comúnmente la conducta depredatoria sucede cuando un organismo, el **depredador**, mata a otro, su presa, para comérselo. Hay parasitismo cuando un organismo, el **parásito**, vive en otro, su **huésped** (habitualmente un organismo mucho más grande) y se alimenta del cuerpo de éste sin matarlo, o al menos no de inmediato. En tanto que los depredadores deben matar a su **presa** para alimentarse, a los parásitos les beneficia que su huésped continúe viviendo.

Son ejemplos de conducta depredatoria los lobos que colaboran para matar un alce (**FIGURA 26-10**) y la planta atrapamoscas que engulle un insecto. La conducta depredatoria se vuelve un factor cada vez más importante en la regulación de poblaciones a medida que las poblaciones de presas aumentan, porque muchos depredadores se alimentan de diversas presas, dando preferencia a las más abundantes y fáciles de encontrar. Los coyotes devorarán probablemente más ratones cuando la población de éstos sea grande; no obstante, optarán por comer más ardillas terrestres a medida que la población de ratones disminuya.

De esta forma los depredadores a menudo ejercen control de la población dependiente de la densidad sobre más de una población de presas. Los depredadores también aumentan al incrementarse el número de sus presas. Por ejemplo, los depredadores como la zorra del Ártico y el búho nival, que consumen lemmings en gran cantidad, regulan el número de sus

FIGURA 26-10 Los depredadores ayudan a regular las poblaciones de sus presas
Estos lobos grises, cazando en manada, atraparon un alce que probablemente había sido debilitado por la vejez o los parásitos.

crías en función de la abundancia de lemmings. El búho nival llega a tener hasta 13 polluelos cuando los lemmings abundan, pero no se reproduce durante los años en que éstos escasean. En ciertos casos, un incremento en el número de depredadores causaría una reducción brusca de la población de la presa, la cual a la vez daría como resultado una disminución en la población de depredadores. Este comportamiento origina **ciclos de población** desfasados, tanto de depredadores como de presas (véase la sección "Investigación científica: Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores").

En ciertos casos, los depredadores mantienen a sus presas muy por debajo de la capacidad de carga. Un ejemplo espectacular de este fenómeno es el nopal de tuna, oriundo de América Latina e introducido en Australia. Por falta de depredadores naturales, el nopal creció exponencialmente y se propagó de forma incontrolable, destruyendo millones de hectáreas de pastizales y praderas valiosas. Finalmente, en la década de 1920 se importó de Argentina una palomilla del nopal (depredadora de su fruto, la tuna) y se dejó en libertad para que se alimentara de los cactos. En unos pocos años los nopales quedaron prácticamente eliminados. En la actualidad la palomilla continúa manteniendo su presa cactácea en densidades de población bastante reducidas, muy por debajo de la capacidad de carga del ecosistema.

Algunos depredadores contribuyen a mantener saludable a la población de sus presas seleccionando aquellas que son genéticamente débiles o que están adaptadas de manera inadecuada. Si la población de presas excede la capacidad de carga de su ambiente, quizás algunos individuos se debiliten por la falta de alimento o sean incapaces de encontrar un refugio apropiado. En tales casos la conducta depredatoria mantendría a la población de presas cercana a una densidad que pueda sostenerse con los recursos del ecosistema.

Los parásitos se extienden más rápidamente entre poblaciones densas

En contraste con los depredadores, los parásitos se alimentan de organismos más grandes, sus huéspedes, a menudo causándoles daño, aunque sin matarlos de inmediato o directamente. Son ejemplos de parásitos todos los organismos que producen enfermedades, como ciertas bacterias, hongos, lombrices intestinales, garrapatas y protistas como el parásito de la malaria. Los insectos que se alimentan de plantas sin matarlas también son parásitos, como la polilla gitana que se alimenta de los árboles. En su mayoría, los parásitos tienen una movilidad limitada y se propagan más fácilmente de un huésped a otro cuando su densidad de población es grande. Por ejemplo, las enfermedades de las plantas y las plagas de insectos se expanden sin dificultad en grandes terrenos cultivados densamente, y las enfermedades infantiles se propagan con rapidez en escuelas y guarderías infantiles. Los parásitos influyen en el tamaño de las poblaciones porque debilitan a sus huéspedes y los hacen más proclives a morir por otras causas, como condiciones climáticas inclementes. Los organismos debilitados por los parásitos también son menos capaces de combatir otras infecciones, huir de depredadores o reproducirse.

Los parásitos y los depredadores tienden a destruir las presas menos aptas y a permitir la reproducción de las presas mejor adaptadas. El resultado de esto es un equilibrio en el que se regula, pero no se elimina, la población de presas. El equilibrio de población de los ecosistemas se destruye cuando se introducen parásitos (o depredadores) en regiones donde las especies de presas locales no han tenido la oportunidad de crear defensas contra ellos. El virus de la viruela, transportado inadvertidamente por los viajeros europeos, causó estragos en la población nativa de Estados Unidos (incluyendo Hawai), Sudamérica y Australia. Traído desde Asia, el hongo que causa el chancro del castaño casi eliminó los castaños silvestres de los bosques estadounidenses. Las ratas y las mangostas que se introdujeron en Hawai han exterminado muchas de las poblaciones de aves nativas del archipiélago.

La competencia por los recursos contribuye a regular las poblaciones

Los recursos que determinan la capacidad de carga (espacio, energía y nutrimentos) suelen ser insuficientes para sostener a todos los organismos que los necesitan. La **competencia**, definida como la interacción entre individuos que intentan utilizar el mismo recurso limitado, restringe el tamaño de la población de un modo dependiente de la densidad. Existen dos formas principales de competencia: la **competencia interespecífica** (entre individuos de especies diferentes) y la **competencia intraespecífica** (entre individuos de la misma especie). Debido a que las necesidades de los miembros de una misma especie, en términos de agua y nutrimentos, refugio, lugares para reproducirse, luz y otros recursos son casi idénticas, la competencia intraespecífica es más intensa que la competencia interespecífica.

Los organismos han perfeccionado varias formas de hacer frente a la competencia intraespecífica. Algunos de ellos, como la mayoría de las plantas y muchos insectos, practican la **competencia por invasión**, que es una especie de batalla campal por obtener los recursos como trofeo. Por ejemplo, cada hembra de polilla gitana pone una cantidad de hasta 1000 huevecillos en los troncos de los árboles del este norteamericano. Cuando se depositan los huevecillos, ejércitos de orugas reptan por el árbol (FIGURA 26-11).

FIGURA 26-11 Competencia por invasión
Polillas gitanas se reúnen en el tronco de un árbol para depositar grandes cantidades de huevecillos, los cuales producen cientos de orugas (recuadro).

Enormes brotes de estas especies invasoras pueden dejar a los árboles grandes completamente sin hojas en unos cuantos días. En tales condiciones, la competencia por alimento podría ser tan grande que la mayoría de las orugas moriría antes de alcanzar la metamorfosis a polilla capaz de poner sus huevecillos. Las semillas de las plantas también pueden germinar en concentraciones densas. A medida que crecen, las plantas que germinan primero comienzan a dar sombra a las más pequeñas; las que tienen los sistemas de raíces más extensos absorben la mayor parte del agua y los individuos que germinan después suelen marchitarse y morir.

Muchos animales (e incluso algunas plantas) han perfeccionado la **competencia por concurso**, en la que se utilizan interacciones sociales o químicas para limitar el acceso a recursos importantes. Las especies territoriales —como los lobos, muchos peces, los conejos y las aves cantoras— defienden una área que contiene recursos importantes, como alimento o lugares para anidar, por ejemplo. Cuando la población comienza a exceder los recursos disponibles, sólo los individuos mejor adaptados consiguen defender los territorios que les brindan alimento y refugio. Los que carecen de territorio probablemente no se reproducirán (lo cual reducirá la población futura), y quizá no obtengan el alimento ni el refugio adecuados, y se vuelvan presas fáciles.

A medida que aumentan las densidades de población y se intensifica la competencia, ciertos animales reaccionan emigrando: en gran número abandonan sus hogares para colonizar nuevas regiones y muchos de ellos, algunas veces la mayoría, mueren en el trayecto. Por ejemplo, los movimientos en masa de lemmings al parecer son una respuesta al hacinamiento. Los enjambres de langostas en migración asolan el continente africano, pues acaban con toda la vegetación a su paso (FIGURA 26-12).

Los factores independientes de la densidad y los dependientes de la densidad interactúan para regular el tamaño de la población

El tamaño de una población en un momento específico es el resultado de interacciones complejas entre formas de resistencia ambiental tanto dependientes como independientes de la densidad. Por ejemplo, un pinar debilitado por la sequía (un factor independiente de la densidad) puede ser más fácilmente víctima del escarabajo de la corteza del pino (un parásito dependiente de la densidad). Asimismo, un caribú debilitado por el hambre (dependiente de la densidad) y atacado por los parásitos (dependientes de la densidad) tiene más probabilidades de morir durante un invierno excepcionalmente frío (un factor independiente de la densidad). Las demandas de las poblaciones humanas cada vez mayores están disminuyendo las capacidades de carga que muchos ecosistemas tienen para sus poblaciones animales y vegetales, lo cual reduce de forma drástica el tamaño de sus poblaciones. Al devastar las praderas y los perros que en ella habitan para construir centros comerciales, o al destruir selvas tropicales para usarlas en la agricultura, sus poblaciones se reducen en una forma independiente de la densidad; sin embargo, el resultado final es una menor capacidad de carga en el ambiente, lo cual a la vez ejerce límites dependientes de la densidad sobre el futuro tamaño de las poblaciones.

FIGURA 26-12 Emigración
En respuesta a la sobrepoblación y a la escasez de alimento, las langostas emigran en enjambres y devoran toda la vegetación a su paso. PREGUNTA: ¿Qué beneficios tiene la emigración masiva para animales como las langostas o los lemmings? ¿Encuentras alguna similitud con la emigración humana?

26.3 ¿CÓMO SE DISTRIBUYEN LAS POBLACIONES EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO?

Las poblaciones presentan diferentes distribuciones espaciales

La modalidad espacial de dispersión de los miembros de una población en una área determinada es la *distribución* de esa población. La distribución puede variar con el paso del tiempo, por ejemplo, cuando cambia con la temporada de apareamiento. Los ecologistas reconocen tres tipos principales de distribución espacial: *agrupada*, *uniforme* y *aleatoria* (FIGURA 26-13).

Hay muchas poblaciones cuyos miembros viven en grupos y cuya distribución puede describirse como **agrupada** (figura 26-13a). Algunos ejemplos son los agrupamientos familiares o sociales, como las manadas de elefantes, lobos o leones; las parvadas de aves; y los cardúmenes de peces. ¿Qué ventajas ofrece tal agrupación? Las parvadas cuentan con muchos ojos capaces de buscar alimento localizado, como un árbol lleno de frutos o un lago con peces. Los peces en cardúmenes y las aves en parvadas crean confusión en los depredadores, simplemente gracias a su número. Asimismo, grupos de depredadores pueden cooperar mutuamente para cazar con mayor eficiencia. Algunas especies forman grupos temporales para aparearse y cuidar de sus crías. Otras poblaciones vegetales o animales se agrupan, no por razones sociales, sino porque los recursos están localizados. Los álamos americanos, por ejemplo, se agrupan a lo largo de los arroyos y ríos de las praderas.

Los organismos con una **distribución uniforme** conservan una distancia relativamente constante entre individuos. Este tipo de distribución es más común entre los animales que defienden territorios y presentan comportamientos territoriales destinados a proteger recursos escasos. Las iguanas macho de las Galápagos establecen territorios de cría regularmente espaciados. En el caso de los animales que permanecen juntos para criar a sus descendientes, el espacio de separación suele referirse a las parejas, no a los individuos. Otras especies territoriales, como el cárabo (autillo), se aparean de por vida y ocupan de forma permanente territorios bien definidos y espaciados de modo relativamente uniforme. Ciertas plantas, como la salvia, por ejemplo, depositan en el suelo a su alrededor sustancias químicas que inhiben la germinación de otras

a)

b)

c)

FIGURA 26-13 Distribuciones de población
a) Agrupada: una reunión de orugas. ***b)*** Uniforme: arbustos de gobernadora en el desierto. ***c)*** Aleatoria: árboles y plantas en una selva tropical.

plantas y, de esta manera, se distribuyen con una separación relativamente uniforme (figura 26-13b). Una distribución uniforme contribuye a asegurar la disponibilidad de recursos adecuados para cada individuo.

Los organismos con una **distribución aleatoria** son relativamente poco frecuentes. Estos individuos no forman grupos sociales. Los recursos que necesitan están disponibles más o menos por igual en toda la región que habitan, cuyos recursos no son lo suficientemente escasos para ameritar la separación territorial. Los árboles y otras plantas de las selvas tropicales tienen una distribución aproximadamente aleatoria (figura 26-13c). Probablemente ninguna especie de vertebrados mantiene una distribución aleatoria durante todo el año, porque todas deben reproducirse y este comportamiento hace inevitable la interacción social.

Las poblaciones presentan tres modalidades básicas de supervivencia

Las poblaciones presentan modalidades características de fallecimiento o, en términos más optimistas, de supervivencia a edades diferentes. Algunas producen números grandes de descendientes, la mayoría de los cuales comúnmente muere antes de alcanzar la edad reproductiva. Otras tienen pocos descendientes, a quienes se les da bastante más recursos y a menudo sobreviven para reproducirse. Para determinar el patrón de supervivencia, los investigadores crearon la *tabla de vida* (**FIGURA 26-14a**). Las **tablas de vida** dan seguimiento de por vida a grupos de organismos que nacen al mismo tiempo, y registran cuántos sobreviven en cada año sucesivo (u otra unidad de tiempo). Al graficar tales resultados se muestran las **curvas de supervivencia** características de la especie en cuestión del ambiente específico de donde se recaban los datos. En la **FIGURA 26-14b** se muestran tres tipos de curva de supervivencia, que pueden describirse como de "pérdida tardía", "pérdida constante" y "pérdida temprana", según la parte del ciclo de vida en que ocurra el mayor número de fallecimientos. Las curvas de supervivencia reflejan el número de descendientes producido, así como la cantidad del cuidado y la protección de sus progenitores que reciben los descendientes.

Las poblaciones con *pérdida tardía* producen curvas de supervivencia de forma convexa. Estas poblaciones tienen índices de mortalidad infantil relativamente bajos, y la mayoría de los individuos sobrevive hasta una edad avanzada. Las curvas de supervivencia de pérdida tardía son características de los seres humanos y de muchos otros animales grandes y longevos, como el elefante y los corderos de la montaña. Estas especies tienen relativamente pocas crías, de cuya protección inicial se encargan sus progenitores.

Las poblaciones con curvas de supervivencia de *pérdida constante* tienen un índice de mortalidad relativamente constante; sus gráficas de supervivencia dan líneas más o menos rectas. En estas poblaciones, los individuos tienen la misma probabilidad de morir en cualquier momento de su vida. Este fenómeno se observa en algunas aves como la gaviota y el petirrojo americano, y en las poblaciones de laboratorio de organismos que se reproducen asexualmente, como las hidras y las bacterias.

La supervivencia con *pérdida temprana* genera una curva *cóncava*, y es característica de los organismos que tienen un gran número de crías. Estas crías reciben poca atención de sus progenitores, quienes las dejan en gran medida libradas a su

Número de sobrevivientes por edad por cada 100,000 nacidos vivos: Estados Unidos, 2002

Edad	Total	Hombres	Mujeres
0	100,000	100,000	100,000
10	99,105	99,014	99,199
20	98,672	98,436	98,922
30	97,740	97,091	98,424
40	96,419	95,381	97,500
50	93,563	91,809	95,364
60	87,711	84,637	90,826
70	75,335	70,087	80,556
80	52,178	44,370	59,621
90	20,052	13,925	25,411
100	2,095	1,005	2,954

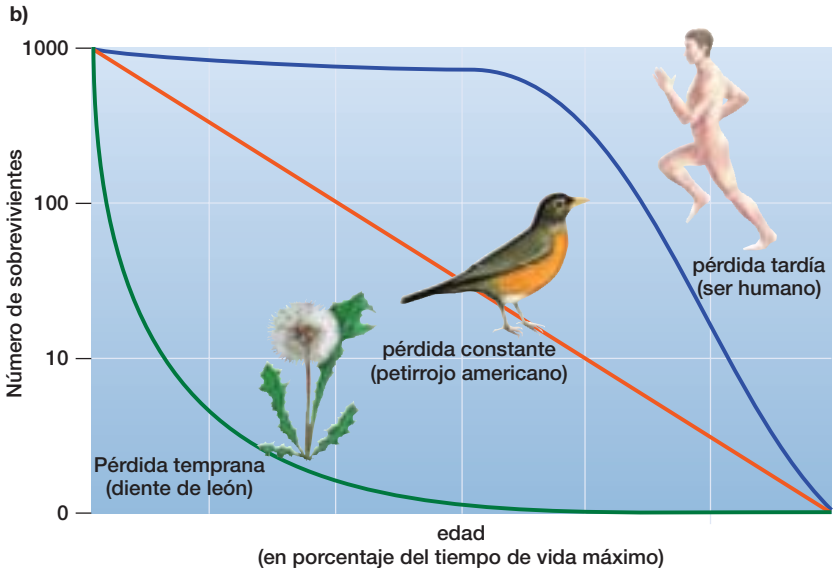


FIGURA 26-14 Tablas de vida y curvas de supervivencia

Una tabla de vida de residentes estadounidenses en 2002. Al graficar estos datos se produce la curva de supervivencia humana que se muestra en *b*). ***b)*** Se muestran los tres tipos de curvas de supervivencia. A causa de las diferencias en el tiempo de vida de estos organismos, se utilizan los porcentajes de sobrevivientes (en vez de las edades). (*Fuente*: National Vital Statistics Reports, vol. 53, núm. 6, 10 de noviembre de 2004).

suerte. Inicialmente muchas enfrentan una ardua competencia por los recursos. El índice de mortalidad es muy elevado entre las crías, pero las que alcanzan la edad adulta tienen buenas posibilidades de sobrevivir hasta una edad avanzada. Casi todos los invertebrados, casi todas las plantas y muchos peces presentan este tipo de curvas de supervivencia de pérdida temprana. Incluso algunos mamíferos tienen curvas de supervivencia de pérdida temprana; en algunas poblaciones de ciervo de cola negra, el 75 por ciento de la población muere en el transcurso del primer décimo de su vida media.

26.4 ¿CÓMO ESTÁ CAMBIANDO LA POBLACIÓN HUMANA?

Los demógrafos estudian los cambios en la población humana

La **demografía** es el estudio del cambio en la población humana. Usando tablas de vida complejas, los *demógrafos* miden las poblaciones humanas en diferentes países y regiones del mundo, siguiendo los cambios poblacionales y realizando comparaciones entre las naciones en desarrollo y las altamente desarrolladas. Examinan los índices de natalidad y de mortalidad por raza, sexo, nivel académico y estatus socioeconómico, tanto al interior de los países como entre éstos. Los demógrafos no sólo estudian las tendencias pasadas y actuales, sino que intentan explicar tales cambios, evaluar su influencia y realizar predicciones para el futuro. Los datos recabados por los demógrafos son útiles para formular políticas en áreas como sanidad pública, vivienda, educación, empleo, migración y protección ambiental.

La población humana continúa creciendo rápidamente

FIGURA 26-15

nes. En el recuadro de la figura 26-15, observa que el tiempo se reduce para incorporar a millones de personas; se estima que el 6 por ciento de los seres humanos que han vivido en la Tierra están vivos en la actualidad. Sin embargo, también advierte que se han agregado miles de millones a una tasa relativamente constante desde la década de 1970. Esto sugiere que, aunque la población humana crece rápidamente, quizá ya no lo haga exponencialmente. ¿Los seres humanos están empezando a entrar a la parte final de la curva de crecimiento en forma de J que se muestra en la figura 26-6 y que a la postre llegará a estabilizarse? Sólo el tiempo lo dirá. No obstante, la población humana sobre la Tierra (que actualmente supera los 6500 millones) ahora crece aproximadamente de 75 a 80 millones cada año: ¡diariamente se incorporan más de 203,000 personas y semanalmente casi 1,500,000! ¿Por qué la resistencia ambiental no ha detenido nuestro crecimiento continuo? ¿Cuál es la capacidad de carga de seres humanos del planeta? Exploraremos esta cuestión más delante en la sección "Guardián de la Tierra: Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra?".

Al igual que todas las poblaciones, los seres humanos enfrentamos resistencia ambiental; pero, a diferencia de las demás, hemos respondido a dicha resistencia ideando formas para vencerla. En consecuencia, la población humana ha crecido durante un lapso sin precedentes. Para dar cabida a nuestro creciente número hemos alterado la faz del planeta. El crecimiento de la población humana ha sido estimulado por una serie de "revoluciones", que conquistaron diversos aspectos de la resistencia ambiental y aumentaron la capacidad de la Tierra para el sostenimiento de personas.

Los adelantos tecnológicos han incrementado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra

Los pueblos primitivos generaron una *revolución cultural y técnica*

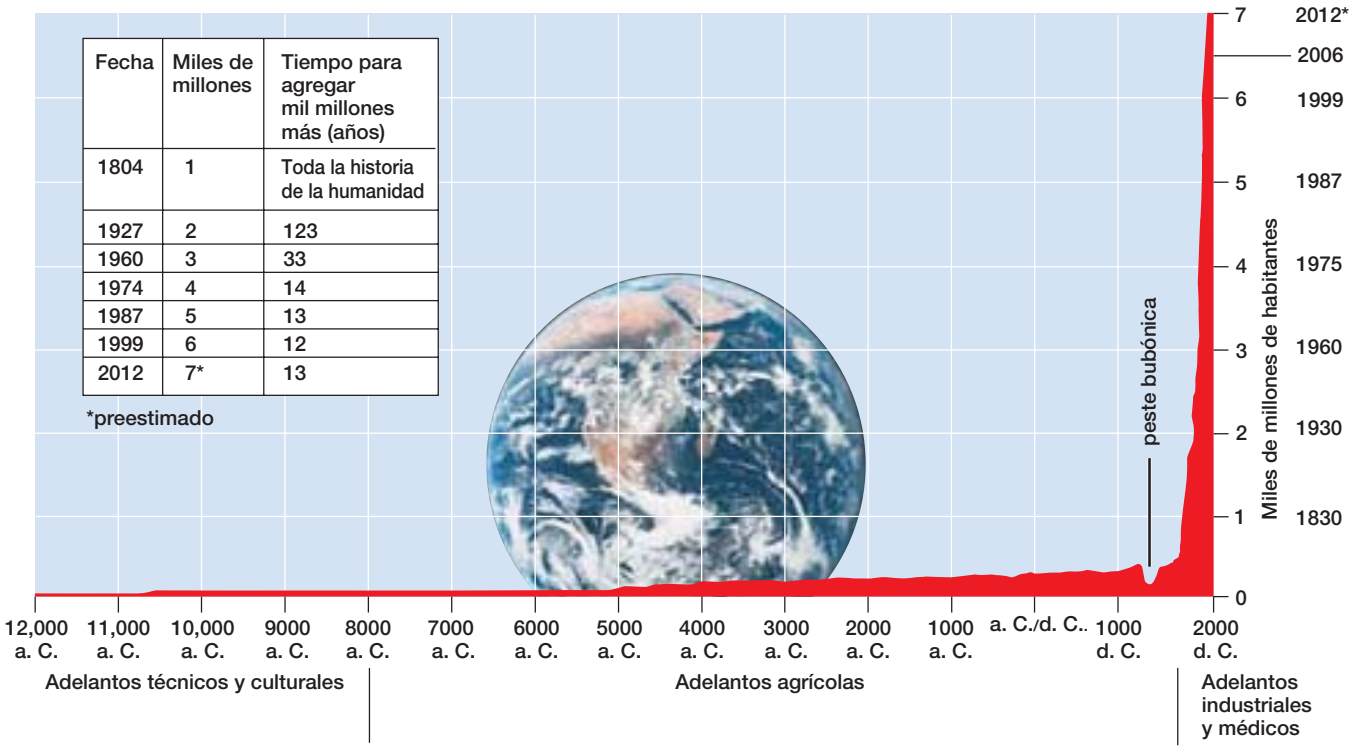


FIGURA 26-15 Crecimiento de la población humana

Desde la Edad de Piedra hasta nuestros días, la población humana ha presentado un crecimiento exponencial continuo, conforme diferentes avances vencieron la resistencia ambiental. Advierte la baja en el siglo XIV debida a la peste bubónica. Observa también los intervalos de tiempo en los que se agregan miles de millones más. (Fotografía) La Tierra es una isla de vida en un océano de vacío; su espacio y sus recursos son limitados. PREGUNTA: La población humana continúa creciendo rápidamente, pero la evidencia sugiere que ya excedimos la capacidad de carga de laTierra a los niveles actuales de la tecnología. ¿Cómo crees que se verá esta curva al llegar al año 2500?¿Y al 3000? Explica.

Los cultivos y los animales domesticados tomaron el lugar de la caza y la recolección alrededor del año 8000 a.C. Esta *revolución agrícola* permitió a la gente disponer de un abasto de alimento mayor y más confiable, y aumentó aún más la capacidad de carga de seres humanos que tenía la Tierra. La mayor disponibilidad de alimento dio como resultado un tiempo de vida más largo y más años de maternidad; sin embargo, todavía un alto índice de mortalidad por enfermedades restringía a la población.

El crecimiento de la población humana prosiguió con lentitud durante miles de años, hasta que se inició la *revolución industrial y médica en* Inglaterra a mediados del siglo XVIII, la cual se propagó al resto de Europa y Norteamérica en el siglo XIX. Los adelantos en medicina hicieron disminuir espectacularmente el índice de mortalidad al reducir la resistencia ambiental ocasionada por las enfermedades. Entre tales adelantos está el descubrimiento de las bacterias y de su papel en las infecciones, lo cual dio origen a la lucha contra las enfermedades bacterianas mediante prácticas sanitarias mejoradas y el uso de antibióticos. Otro adelanto fue el descubrimiento de los virus, a partir del cual se perfeccionaron vacunas para enfermedades como la viruela.

En la actualidad las naciones del mundo se clasifican como *desarrolladas* o en *desarrollo*. La gente que vive en países desarrollados —como Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental, Australia, Nueva Zelanda y Japón— se benefician de estándares de vida relativamente altos, con acceso a la tecnología moderna y a la atención médica, incluyendo la anticoncepción. Además, aquí los ingresos son relativamente elevados; las oportunidades de empleo y de educación están disponibles para ambos géneros; y los índices de mortalidad por enfermedades infecciosas son relativamente bajos. Sin embargo, menos del 20 por ciento de los habitantes del planeta viven en naciones desarrolladas. La mayoría de la gente en los países en desarrollo (Centro y Sudamérica, y gran parte de Asia y África) carecen de muchas de tales ventajas.

La transición demográfica ayuda a estabilizar a las poblaciones

En los países desarrollados, la revolución industrial y médica originó un crecimiento inicial de la población debido a la disminución de los índices de mortalidad, los cuales van seguidos por una disminución en los índices de natalidad, dando como resultado una población relativamente estable. Esta cambiante

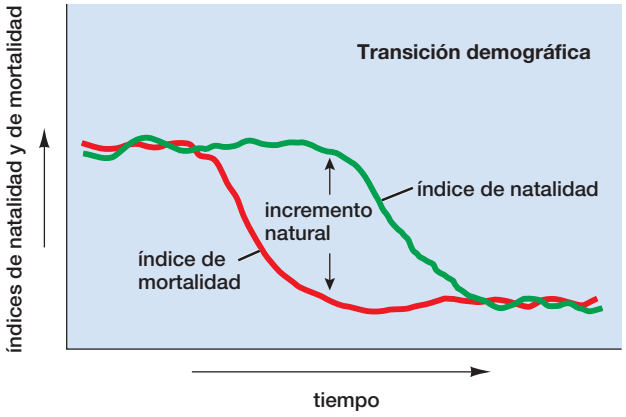


FIGURA 26-16 La transición demográfica

GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra?

En Costa de Marfil, un pequeño país de la costa occidental de África, el gobierno libra una batalla para proteger parte de su selva tropical cada vez más reducida, contra miles de cazadores, agricultores y leñadores ilegales. Los funcionarios prenden fuego a las viviendas de los moradores ilegales, quienes de inmediato regresan y las reconstruyen. Un residente ilegal es Sep Djekoule, quien explica: "Tengo diez hijos y necesitamos comer. En la selva es donde puedo sostener a mi familia y todos tenemos ese derecho". Sus palabras ilustran el conflicto entre el crecimiento demográfico y la protección ambiental, entre el "derecho" a tener más hijos y la capacidad de mantenerlos usando los recursos limitados de la Tierra. Una moderada proyección de la Organización de las Naciones Unidas es que la población humana llegará a 9000 millones para el año 2150 y que todavía seguirá en aumento. ¿Cuántos habitantes puede sostener nuestro planeta?

Los ecologistas coinciden en que el concepto de capacidad de carga se vuelve confuso para la gente, porque las personas utilizan tecnología para vencer la resistencia ambiental y así incrementar la disponibilidad de alimento, curar enfermedades y prolongar la vida. Además, desde la época en que los seres humanos vivían en cavernas, nuestras constantes y crecientes expectativas de comodidad y movilidad han reducido la capacidad de la Tierra para sostenernos. Podemos y debemos emplear tecnología para reducir nuestra influencia destructora, por ejemplo, mejorando las prácticas agrícolas, conservando la energía y el agua, reduciendo los contaminantes, y reciclando mucho más papel, plástico y metal. Sin embargo, nuestra capacidad de reproducción excede con mucho nuestras posibilidades de incrementar la capacidad de la Tierra para sostenernos.

Un grupo de científicos grande de todas partes del mundo está participando en un proyecto continuo para evaluar el impacto de los seres humanos sobre los ecosistemas mundiales. Están comparando la demanda de recursos de la población humana mundial con la capacidad de los ecosistemas del mundo para abastecer tales recursos, que incluyen tierras agrícolas, peces y otros alimentos salvajes, madera, espacio y energía. Los investigadores estiman la cantidad de espacio biológicamente productivo o *biocapacidad* necesaria para absorber el dióxido de carbono generado por el uso de fuentes de energía y para satisfacer las demandas de recursos de una persona promedio a los niveles actuales de tecnología. Denominan esta área **huella ecológica**. Su estimación más reciente (con base en datos de 2002) fue que la Tierra tenía 1.8 hectáreas disponibles por cada uno de sus 6200 millones de seres humanos. No obstante, la huella ecológica en promedio era de 2.2 hectáreas. Esto sugiere que incluso en 2002, cuando nuestro planeta soportaba más de 300 millones de personas menos que las más de 6500 millones actuales, la huella colectiva de la humanidad excedía la biocapacidad en cerca de 20 por ciento. Inquietantemente tales estimaciones suelen ser conservadoras: no toman en cuenta el agotamiento de las reservas subterráneas de agua dulce ni la necesidad de dejar porciones considerables de la biosfera intactas para brindar un hábitat a las especies silvestres.

Una población que excede la capacidad de carga daña al ecosistema y reduce su capacidad para sostenerla. En los siguientes párrafos, veremos cómo la humanidad está agotando la fuente de recursos del planeta y reduciendo su capacidad para mantenernos.

Cada año, el pastoreo excesivo y la deforestación reducen la productividad de la tierra, especialmente en los países en desarrollo. En un mundo donde, según estimaciones de Naciones Unidas, más de 850 millones de personas padecen desnutrición crónica, una porción significativa de las tierras agrícolas del mundo sufren una erosión que reduce su fertilidad tanto para los cultivos como para el pastoreo (**FIGURA E26-3**). La búsqueda de más terrenos agrícolas origina deforestación e intentos por cultivar tierras poco idóneas para la agricultura. La demanda de madera también ocasiona que cada año grandes áreas se deforesten, fomentando la escorrentía de la tan preciada agua

dinámica poblacional en la que la población tiene un crecimiento rápido y luego regresa a la estabilidad (aunque mucho más grande), se denomina **transición demográfica** (**FIGURA 26-16**).

Esta disminución en los índices de natalidad que concluye con la transición demográfica es atribuible a muchos factores, entre ellos una mejor educación, mayor disponibilidad de anticonceptivos, un cambio hacia una vida principalmente urbana (donde procrear ofrece menos ventajas que en las zonas agrícolas) y más opciones profesionales para la mujer. En la mayoría de los países desarrollados ya se dio la transición demográfica y las poblaciones son más o menos estables. Las poblaciones se estabilizan cuando los adultos en edad reproductiva han tenido suficientes descendientes para remplazarse a sí mismos, una situación que se conoce como **fertilidad en el nivel de reposición** (RLF). Como no todos los niños sobreviven hasta la madurez, la RLF es ligeramente mayor que 2 (2.1).

El crecimiento demográfico se distribuye de manera desigual

En los países en desarrollo, como en gran parte de Centro y Sudamérica, Asia (sin incluir a China ni a Japón) y África (excluyendo a aquellos devastados por la epidemia del SIDA), los adelantos en medicina han reducido los índices de mortalidad y alargado el tiempo de vida; no obstante, los índices de natalidad continúan siendo altos. Estos países están en diferentes etapas de la transición demográfica. Aunque China es un país en desarrollo, su gobierno reconoció los impactos negativos del crecimiento demográfico continuo e instauró reformas sociales que han llevado a los índices de natalidad a niveles por debajo de la RLF. En otras naciones en desarrollo, a veces los hijos son el único sostén de los padres ancianos, son una fuente importante de mano de obra (en especial en las granjas, aunque también en las fábricas) y pueden ser fuente de prestigio social. En algunos países las creencias religiosas promueven las familias numerosas y favorecen los altos índices de natalidad. Además, muchas mujeres que buscan limitar el tamaño de su familia carecen de acceso a los anticonceptivos. En Nigeria, el país más poblado de África, sólo el 8 por ciento de las mujeres usan métodos anticonceptivos modernos y la mujer promedio tiene seis hijos. Nigeria padece ya la pérdida de sus bosques y vida silvestre, la erosión del suelo y la contaminación del agua. De sus más de 134 millones de habitantes, el 43 por ciento son menores de los 15 años de edad, de manera que es indudable que el crecimiento demográfico continuará.

El crecimiento demográfico es mayor en los países que menos pueden solventarlo. Esto origina un tipo de círculo vicioso: conforme más personas comparten los mismos recursos limitados, se incrementa la pobreza, la cual desvía a los niños

dulce, la erosión de la valiosa capa arable, la contaminación de los ríos y una disminución general en la capacidad de la tierra para futuros cultivos o bosques. La demanda de madera, alimento y recientemente *biocombustibles* (cultivos como la semilla de soya para usar como combustible) cada año contribuye a la destrucción de millones de hectáreas de selva tropical, y a la extinción de especies en una escala sin precedentes (véase el capítulo 30). A nivel mundial la cantidad de tierras de cultivo por persona ha disminuido a casi la mitad en los últimos 50 años.

En muchos países en desarrollo, incluyendo a la India y a China (cada uno hogar de más de mil millones de seres humanos), el suministro de agua potable es escaso. En esos países los *mantos acuíferos* para irrigar los cultivos se están agotando rápidamente. Como las tierras irrigadas abastecen cerca del 40 por ciento de los cultivos de consumo humano, la futura escasez de agua rápidamente podría conducir a una escasez de alimentos.

La recolección mundial de peces alcanzó un máximo a finales de la década de 1980 y ha estado disminuyendo gradualmente desde entonces, pese a la mayor inversión en equipo de pesca, a la tecnología mejorada para la detección de cardúmenes y a la cada vez más frecuente cría de varios tipos de peces. Cerca del 70 por ciento de las poblaciones oceánicas de peces comerciales han sido explotadas hasta el límite o en exceso, y muchas pesquerías anteriormente abundantes, como la del bacalao de Nueva Inglaterra, Canadá y el Mar del Norte, dramáticamente se han venido abajo debido a la captura excesiva.

Éstos son indicios claros de que nuestra población actual, en su nivel tecnológico existente, está "pastoreando en exceso" el ecosistema mundial. Conforme más de 5200 millones de personas en los países de menor desarrollo se esfuerzan por mejorar sus estándares de vida, se acelera el daño al ecosistema de nuestro planeta. Al estimar cuántos habitantes puede —o debe— sostener la Tierra, debemos tener en cuenta que los seres humanos buscan algo más en la vida que simplemente permanecer vivos. El estándar de vida en los países altamente desarrollados ya es un lujo inalcanzable para la mayoría de los habitantes del mundo.

FIGURA E26-3 La deforestación conduce a la pérdida de tierras productivas
Las actividades humanas, entre ellas el pastoreo excesivo de ganado, la deforestación y las prácticas agrícolas deficientes, reducen la productividad de las tierras. (Recuadro) Una población humana en expansión, aunada a la pérdida de tierras productivas, puede originar tragedias.

Inevitablemente la población humana cesará de crecer. Ya sea que voluntariamente reduzcamos nuestros índices de natalidad o que varias fuerzas de resistencia ambiental, como las enfermedades y el hambre, hagan aumentar terriblemente los índices de mortalidad humana; la elección está en nuestras manos. La esperanza para el futuro reside en reconocer los indicios del "pastoreo humano excesivo" y en actuar para reducir nuestra población antes de que hayamos diezmado nuestra biodiversidad y dañado irremediablemente la biosfera.

de la escuela hacia otras actividades para ayudar a sostener a sus familias. La falta de educación y de acceso a los anticonceptivos, entonces, contribuye a mantener altos los índices de natalidad. De los más de 6500 millones de habitantes con que actualmente cuenta la Tierra, cerca de 5200 millones residen en países en desarrollo. Afortunadamente, los índices de natalidad en algunos países en desarrollo están empezando a disminuir y a acercarse a la RLF, gracias a las medidas que están tomando sus gobiernos para fomentar las familias pequeñas y el uso de anticonceptivos. Por desgracia, en un futuro cercano las posibilidades de que la población se estabilice —con *crecimiento demográfico cero*— son nulas. La Organización de las Naciones Unidas predice que para el año 2050 habrá casi 9000 millones de habitantes y continuará creciendo (aunque de forma mucho más lenta que en la actualidad), y 7800 millones de los cuales vivirán en los países en desarrollo (**FIGURA 26-17**).

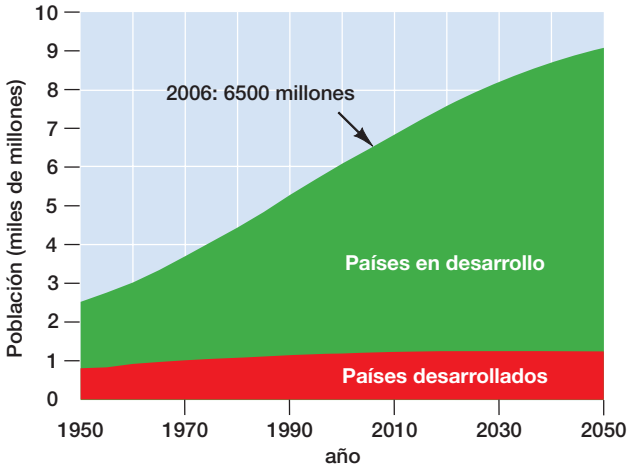


FIGURA 26-17 Proyecciones de población según la ONU en países en desarrollo en comparación con países desarrollados

La estructura de edades actual de una población predice su crecimiento futuro

La recopilación de datos por parte de los demógrafos permite determinar la **estructura de edades** de las poblaciones humanas. Los diagramas de la estructura de edades muestran a grupos de edad en el eje vertical, en tanto que los números (o porcentajes) de individuos en cada grupo de edad se presentan en el eje horizontal, graficando a los hombres y las mujeres en lados opuestos. Todos los diagramas de estructura de edades se elevan hasta un máximo en la parte superior, lo cual refleja el periodo de vida humana máximo; sin embargo, la

forma del resto del diagrama muestra si la población se expande, es estable o disminuye. Si los adultos en edad reproductiva (de los 15 a los 44 años de edad, aproximadamente) tienen más hijos (de 0 a 14 años de edad) que los necesarios para reponerse a sí mismos, la población está arriba de su RLF y aumenta. Su estructura de edades se parecerá a una pirámide (**FIGURA 26-18a**). Si los adultos en edad reproductiva tienen sólo el número de hijos necesarios para reponerse a sí mismos, la población estará en la RLF. Una población que ha estado por varios años en la RLF tendrá un diagrama de estructura de edades con lados relativamente rectos (**FIGURA 26-18b**). En las poblaciones que disminuyen, los adultos en edad reproductiva tienen menos hijos que los necesarios para reponerse a sí mismos, y la estructura de edades se estrecha en la base (**FIGURA 26-18c**).

La **FIGURA 26-19** muestra las estructuras de edades promedio de las poblaciones en los países desarrollados y en desarrollo, para el año 2006 y con proyecciones para 2025 y 2050. Incluso si los países que crecen con rapidez alcanzaran de inmediato la RLF, su población seguiría creciendo durante décadas, ya que los niños actuales crean un impulso para el crecimiento futuro, conforme lleguen a la edad reproductiva e inicien sus propias familias, aun considerando que sólo tengan dos hijos. Esto impulsa el crecimiento demográfico de China al 0.6 por ciento anual, incluso con un índice de fertilidad al nivel de la RLF. Menos del 20 por ciento de individuos en una población estable están en el grupo de edad prerreproductiva (1 a 14 años). En México este grupo de edad constituye el 31 por ciento de la población, y en muchos países africanos los niños abarcan más del 40 por ciento de la población.

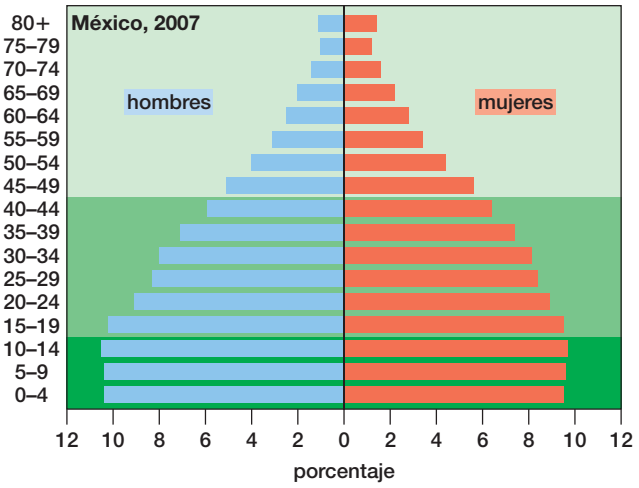
En Europa la fertilidad está por debajo del nivel de reposición

La **FIGURA 26-20** ilustra los índices de crecimiento de varias regiones en el mundo. En Europa el cambio anual promedio en la población es de −0.1 por ciento, y el índice de fertilidad media es de 1.4 (muy por debajo de la RLF), ya que las mujeres suelen retardar la maternidad o a renunciar a ella por diversas razones, relacionadas tanto con la economía familiar como con el estilo de vida.

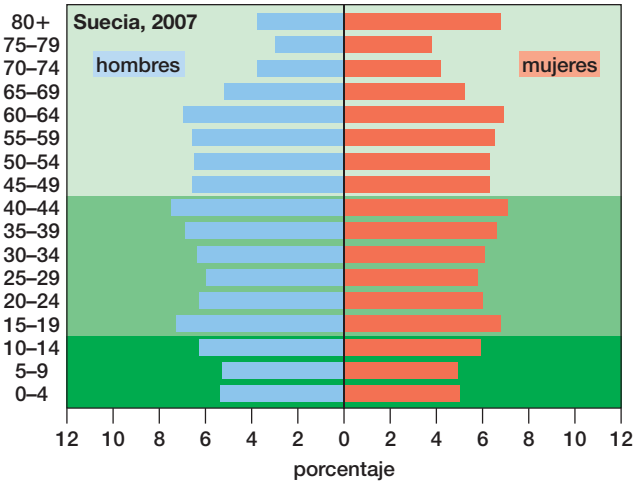
Esta situación origina preocupaciones gubernamentales acerca de la disponibilidad de futuros trabajadores y contribuyentes para sostener al creciente porcentaje de adultos mayores. Varias naciones europeas están ofreciendo o considerando incentivos (como exenciones fiscales importantes) para las parejas que tengan hijos a una edad temprana, lo cual reduce la brecha generacional e incrementa la población. Japón, un país del tamaño del estado de Montana, tiene cerca de 128 millones de habitantes (el 42 por ciento de la población total de Estados Unidos). No obstante, a pesar del hacinamiento su gobierno está preocupado por el bajo índice de fertilidad nipón (1.3) y aporta diversos subsidios que alientan a tener familias más grandes.

Aunque una población reducida y finalmente estable ofrecerá enormes beneficios tanto para los seres humanos como para la biosfera que los sustenta, las actuales estructuras económicas en países de todo el mundo se basan en poblaciones en crecimiento. El difícil ajuste que requiere la estabilización o la disminución de las poblaciones lleva a los gobiernos a adoptar políticas que fomentan la maternidad y el crecimiento continuo.

a) Pirámide demográfica de México



b) Pirámide demográfica de Suecia



c) Pirámide demográfica de Italia

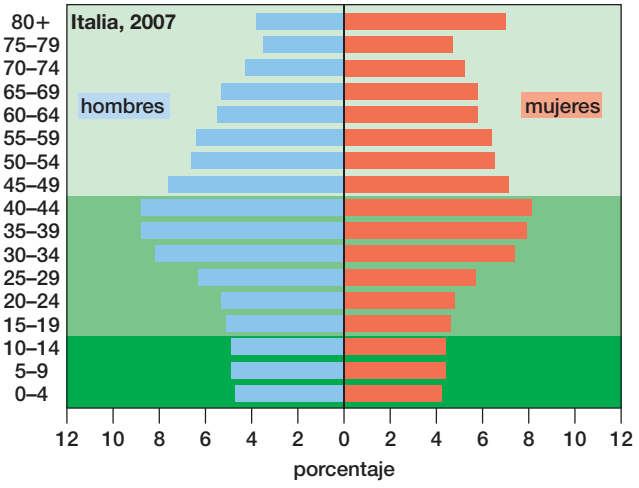


FIGURA 26-18 Diagramas de estructuras de edades
a) México crece muy rápidamente. ***b)*** Suecia tiene una población estable. ***c)*** La población de Italia está disminuyendo. (*Fuente*: Datos proporcionados por el U.S. Census Bureau; http://www.census.gov).

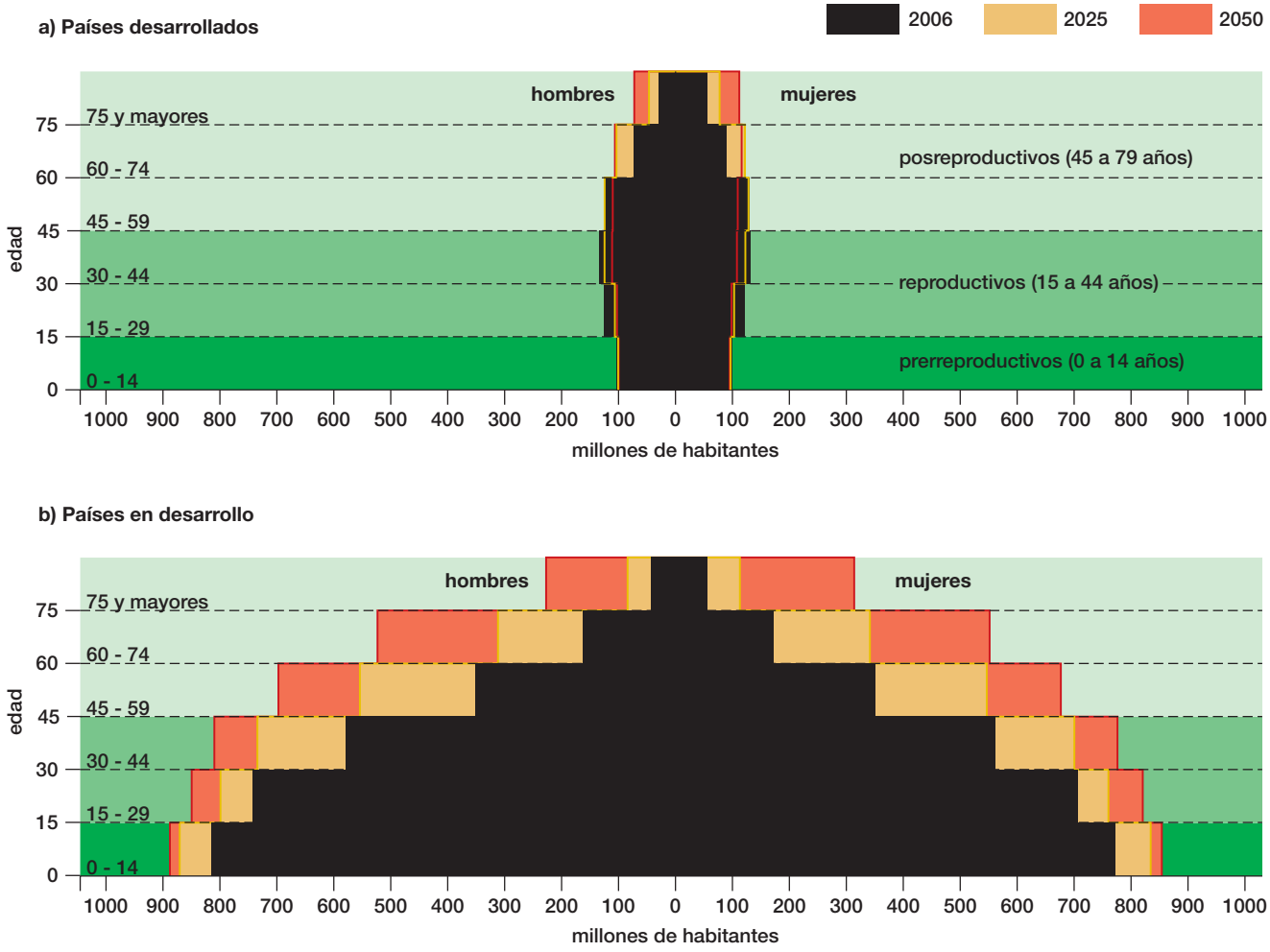


FIGURA 26-19 Estructuras de edades en países desarrollados y en desarrollo
Observa que en los países en desarrollo las predicciones indican que el número excedente de hijos sobre los padres es menor en 2025 y en 2050, conforme sus poblaciones se aproximan a la RLF. Sin embargo, conforme grandes números de jóvenes entren a la edad reproductiva, continuarán creciendo. (*Fuente*: Datos proporcionados por el U.S. Census Bureau; http://www.census.gov). PREGUNTA: ¿Cómo el índice de fertilidad por arriba de la RLF crea un efecto de círculo vicioso en el crecimiento demográfico?

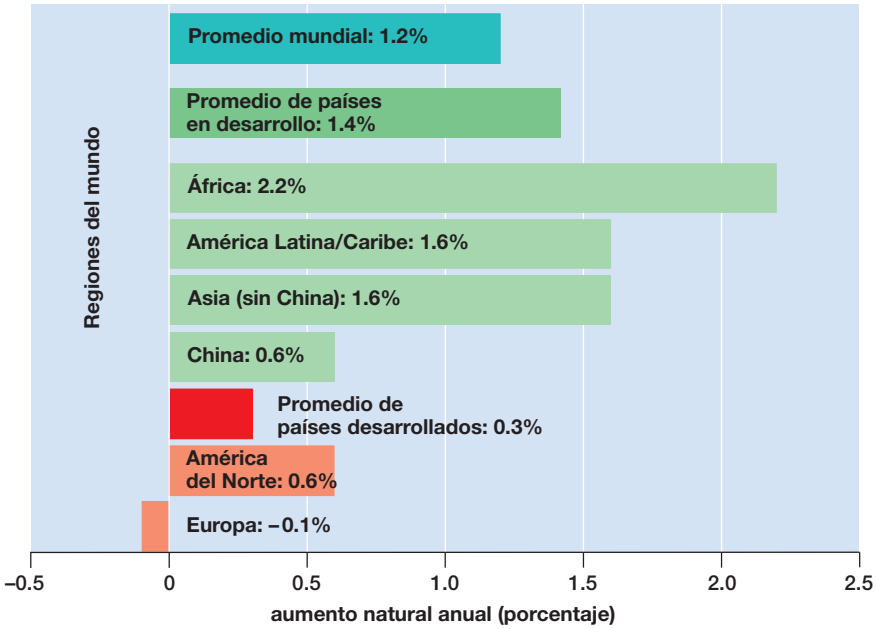


FIGURA 26-20 Crecimiento demográfico por regiones del mundo
Los índices de crecimiento que se muestran se deben al aumento natural (nacimientos – fallecimientos) expresados como el porcentaje de incremento por año en diversas regiones del mundo. Estas cifras no incluyen la inmigración ni la emigración. (*Fuente*: Datos tomados del Population Referente Bureau, World Population Data Sheet, 2005; www.prb.org/pdf05/05WorldDataSheet_Eng.pdf). PREGUNTA: ¿Por qué hay esas diferencias demográficas tan grandes entre los países desarrollados y los países en desarrollo?

La población de Estados Unidos crece rápidamente

FIGURA 26-21) es el país desarrollado de más rápido crecimiento en el mundo. Con un incremento natural del 0.6 por ciento, la población estadounidense crece a un índice seis veces mayor que el índice promedio de los países desarrollados. Entre 2004 y 2005 Estados Unidos creció aproximadamente 1 por ciento agregando 3 millones de nuevas personas (más de 8000 al día). El índice de fertilidad es actualmente de cerca de 2.0 ligeramente menor de la RLF (2.1). No obstante, cada año la inmigración a Estados Unidos incorpora cerca de 1 millón de personas de manera legal y un estimado de 500,000 ilegales, lo cual representa aproximadamente la mitad del incremento demográfico. El índice de fertilidad promedio de estos inmigrantes es superior a la RLF, lo cual incrementa su impacto sobre el crecimiento demográfico. Esta situación garantiza el continuo crecimiento demográfico estadounidense para el futuro indefinido.

El rápido crecimiento de la población estadounidense tiene importantes implicaciones ambientales tanto para el país como para el resto del mundo. El estadounidense promedio consume cinco veces más energía que el promedio mundial (véase "Enlaces con la vida: Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu 'huella'?"). Los 3 millones de personas que se incorporan a Estados Unidos utilizan 2.5 veces más energía de lo que consumirían casi 18 millones de personas que se incorporaran a la India en el mismo año. La inexorable expansión de viviendas, establecimientos comerciales y empresas de extracción de energía degradan o destruyen hábitat naturales, reduciendo así la capacidad de carga que una variedad de ecosistemas tienen para otras formas de vida.

¿Cuándo y cómo se estabilizará el número de seres humanos? ¿Cuántos habitantes puede sostener la Tierra? No tenemos respuestas certeras para tales preguntas, pero en la sección "Guardián de la Tierra: ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra?", las exploramos con más detenimiento.

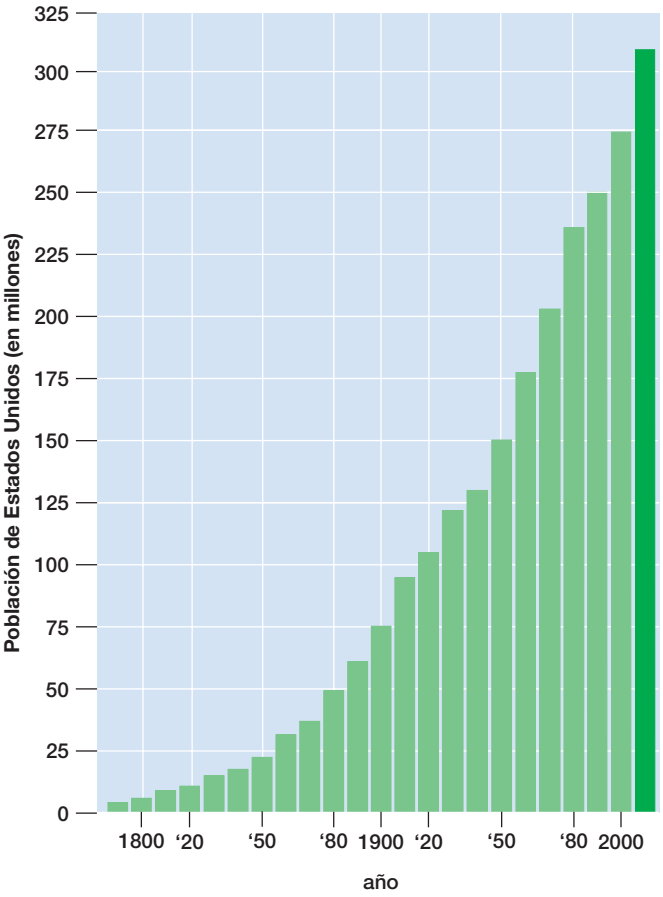


FIGURA 26-21 Crecimiento de la población estadounidense A partir de 1790, el crecimiento de la población estadounidense ha presentado la curva con forma de J característica del crecimiento exponencial. PREGUNTA: ¿En qué etapa de la curva en forma de S se encuentra la población estadounidense? ¿Qué factores crees que causarán su estabilización y cuándo?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

EL MISTERIO DE LA ISLA DE PASCUA

La prehistoria de la Isla de Pascua está rodeada de misterio. ¿La gente deforestó la isla, o las ratas que se escondían en sus canoas provocaron el caos ecológico consumiendo tanto las semillas para sembrar como la vida silvestre nativa? Los fósiles revelan que la Isla de Pascua fue una vez el hogar de loros, lechuzas, garzas y diversas especies de otras aves. Al menos 25 especies de aves marinas incluyendo albatros, bobos y fragatas alguna vez anidaron en la isla. En la actualidad la Isla de Pascua no tiene aves terrestres nativas ni mamíferos; ningún animal más grande que un insecto es un residente permanente del lugar.

Cuando los bosques y su fauna desaparecieron, quizá la población humana de la isla careció de la alimentación adecuada. Sin madera para canoas o lanchas, no había forma de salir de la isla y pescar en mar abierto. De forma inquietante, la basura que se apiló desde el periodo post-bosque contenía unos cuantos ejemplares de huesos humanos roídos, lo cual sugiere que como resultado de la falta de alimentos pudo haberse presentado el canibalismo. Durante la segunda mitad del siglo XIX, la historia de la isla estuvo perdida conforme sus habitantes fueron tomados cautivos como esclavos y asolados por enfermedades traídas desde tierras extrañas.

Los primeros moradores humanos de la Isla de Pascua encontraron una isla boscosa que contenía abundantes recursos naturales y una diversidad de especies animales y vegetales útiles para los seres humanos. No obstante, con el paso del tiempo algunos científicos supusieron que la población creció hasta superar la capacidad ambiental para sostenerlos. Al igual que la población de renos de la isla Saint Paul, la población humana de la Isla de Pascua quizás haya dañado el ecosistema del cual dependía. Esto pudo haber causado que la población disminuyera drásticamente y que su sociedad se desintegrara.

¿Qué podemos aprender de la Isla de Pascua? De acuerdo con el autor y biólogo Jared Diamond, "el significado de la Isla de Pascua para nosotros debería ser evidentemente escalofriante. La Isla de Pascua tiene un mensaje importante para todos. En la actualidad, de nueva cuenta, una población creciente enfrenta la disminución de los recursos. Tampoco tenemos válvula de escape porque todas las sociedades humanas están ligadas por el transporte internacional, ni podemos huir al espacio de la misma manera que los habitantes de la Isla de Pascua no pudieron sobrevolar el océano. Si continuamos siguiendo nuestro curso actual, agotaremos los principales recursos marinos, selvas tropicales, combustibles fósiles y muchas de nuestras tierras para cuando nuestros hijos alcancen nuestra edad actual".

Piensa en esto La Isla de Pascua es pequeña (171 kilómetros cuadrados) y está a 1931 kilómetros de la isla habitable más próxima. ¿Por qué fue especialmente susceptible al deterioro de su población?

ENLACES CON LA VIDA Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"?

Ahora sabes que una "huella ecológica" mide el impacto ambiental de una persona. Mientras que las poblaciones animales suelen tener las huellas mínimas necesarias para mantenerse saludables y reproducirse, las huellas ecológicas humanas difieren exageradamente entre diferentes países y entre individuos dentro de esos países. ¿Qué determina el tamaño de la huella ecológica de una persona? Si buscas en Internet "huella ecológica" encontrarás sitios Web que además de describir el concepto, comparan diferentes países y te permiten calcular tu propia huella. Encontrarás que tu uso de energía, el tipo de casa en que vives e incluso los alimentos que ingieres influyen en tu huella.

En promedio, los habitantes de Estados Unidos tienen huellas más grandes que las personas de cualquier otro país del mundo. Las huellas estadounidenses promedian casi 10 hectáreas por persona. En comparación con el promedio mundial de 2.2 hectáreas por persona, en tanto que se estima que la biocapacidad de la Tierra es de 1.8 hectáreas por persona. Si los restantes 6300 millones de habitantes del planeta vivieran tan extravagantemente como el ciudadano estadounidense promedio, necesitaríamos 5.4 Tierras para satisfacer su demanda. La gente en los Países Bajos y en Canadá también disfruta un alto estándar de vida con huellas 5.6 y 6.8 hectáreas, respectivamente. No obstante, necesitaríamos 3.8 Tierras para sustentar nuestra población mundial actual con el estándar de vida promedio canadiense.

Sin embargo, te preguntarás ¿qué tiene de malo comer carne o frutas importadas, conducir un automóvil o vivir en una casa con un enorme jardín? De hecho, no hay nada inherentemente incorrecto en todas esas situaciones: se han vuelto ambientalmente nocivas sólo por el error permanente de la humanidad de no limitar su población. Los individuos deben reconocer que la decisión de tener más de dos hijos dará como resultado más huellas que pisen el planeta y menores recursos que los necesarios. Por ejemplo, si mil millones de personas habitaran la Tierra, cada individuo viviría con una comodidad razonable sin dañar el planeta. Menos huellas también nos permitirían reservar suficientes terrenos vírgenes para la supervivencia y el bienestar continuos de millones de especies irremplazables, que proporcionan la rica biodiversidad de la Tierra.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

26.1 ¿Cómo cambian de tamaño las poblaciones?

Los individuos se integran a las poblaciones por nacimiento o inmigración, y las abandonan por muerte o emigración. El tamaño definitivo de una población estable es el resultado de interacciones entre el potencial biótico (el índice de crecimiento máximo posible) y la resistencia ambiental (que limita el crecimiento de las poblaciones).

Todos los organismos tienen el potencial biótico para reponerse sobradamente a sí mismos durante su vida, lo cual da por resultado el crecimiento de la población. Las poblaciones tienden a crecer exponencialmente, agregándose números crecientes de individuos durante cada periodo sucesivo. Las poblaciones no pueden crecer exponencialmente por tiempo indefinido; o bien se estabilizan, o tienen ciclos periódicos de auge y decadencia como resultado de la resistencia ambiental.

Web tutorial 26.1 Crecimiento y regulación de la población

26.2 ¿Cómo se regula el crecimiento de las poblaciones?

La resistencia ambiental restringe el crecimiento de las poblaciones, ya que aumenta el índice de mortalidad o disminuye el índice de natalidad. El tamaño máximo al que un ecosistema puede mantener indefinidamente una población se denomina capacidad de carga, *K*, y está determinado por recursos limitados, como espacio, nutrimentos y luz. En general la resistencia ambiental mantiene las poblaciones en la capacidad de carga o por debajo de ella. En la Naturaleza las poblaciones pueden rebasar *K* temporalmente al agotar su fuente de recursos. De acuerdo con la cantidad de daño a los recursos fundamentales, esto conduce a que 1. la población oscile alrededor de *K*

El crecimiento de las poblaciones está restringido por formas de resistencia ambiental independientes de la densidad (como el clima) y por formas de resistencia dependientes de la densidad (como competencia, comportamientos depredatorios y parasitismo).

Web tutorial 26.2 Crecimiento de la población humana

26.3 ¿Cómo se distribuyen las poblaciones en el espacio y en el tiempo?

Las poblaciones se clasifican en tres tipos principales según su distribución: agrupadas, uniformes y aleatorias. Las distribuciones agrupadas se dan por razones sociales o en torno a recursos limitados. Normalmente una distribución uniforme es el resultado de la separación territorial. La distribución aleatoria es poco frecuente: se da sólo cuando los individuos no interactúan socialmente y cuando los recursos son abundantes y están distribuidos de manera uniforme.

Las poblaciones presentan curvas de supervivencia específicas que describen la probabilidad de sobrevivir a cualquier edad determinada. Las curvas de pérdida tardía (convexas) son características de las especies longevas con pocas crías, que reciben cuidados de sus progenitores. Las especies con curvas de pérdida constante tienen la misma probabilidad de morir a cualquier edad. Las curvas de pérdida temprana (cóncavas) son típicas de los organismos que tienen numerosos descendientes, la mayoría de las cuales mueren antes de alcanzar la madurez.

26.4 ¿Cómo está cambiando la población humana?

resistencia ambiental y aumentado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra. Los diagramas de estructura de edades muestran las cifras de hombres y mujeres de diversos grupos de edad que una población comprende. Las poblaciones en expansión tienen estructuras de edades piramidales, las poblaciones estables presentan estructuras de edades de lados más bien rectos, y las poblaciones que se reducen tienen estructuras de edades que se estrechan en la base.

En la actualidad, la mayoría de los habitantes del planeta viven en países en desarrollo con poblaciones en expansión. Aunque los índices de natalidad se han reducido considerablemente en muchos lugares, el impulso de los altos índices de natalidad previos originan un importante crecimiento demográfico continuo. Estados Unidos es el país desarrollado que crece con mayor rapidez, debido tanto a los altos índices de natalidad como a los altas tasas de inmigración. Recientemente los científicos han estimado la cantidad de espacio biológicamente productivo necesario para satisfacer las demandas de una persona promedio con los niveles actuales de tecnología. Esta "huella ecológica" ofrece evidencia de que las demandas de los más de 6500 millones de habitantes del planeta exceden los recursos sustentablemente disponibles. La constante disminución de varios recursos sugiere que estamos dañando nuestro ecosistema mundial, reduciendo así su capacidad futura para darnos sustento. Conforme la población estadounidense siga creciendo con rapidez y la gente en los países menos desarrollados se esfuerce por aumentar sus estándares de vida, el daño se acelerará. A diferencia de otros animales los seres humanos pueden tomar decisiones conscientes para revertir las tendencias nocivas.

TÉRMINOS CLAVE

abiótico *pág. 514*
biótico *pág. 514*
capacidad de carga o sostenimiento (K) *pág. 518*
ciclo de auge y decadencia *pág. 516*
ciclo de población *pág. 523*
competencia *pág. 523*
competencia interespecífica *pág. 523*
competencia intraespecífica *pág. 523*
competencia por concurso *pág. 524*
competencia por invasión *pág. 523*
comunidad *pág. 514*
crecimiento demográfico logístico *pág. 518*
crecimiento exponencial *pág. 515*
curva J *pág. 515*
curva S *pág. 518*
demografía *pág. 526*
dependiente de la densidad *pág. 522*
depredador *pág. 522*
distribución agrupada *pág. 524*
distribución aleatoria *pág. 525*
distribución uniforme *pág. 524*
ecología *pág. 514*
ecosistema *pág. 514*
emigración *pág. 514*
estructura de edades *pág. 529*
especies invasoras *pág. 518*
fertilidad en el nivel de reposición (RLF) *pág. 528*
huella ecológica *pág. 528*
huésped *pág. 522*
independiente de la densidad *pág. 522*
índice de crecimiento *pág. 514*
índice de mortalidad *pág. 514*
índice de natalidad *pág. 514*
inmigración *pág. 514*
parásito *pág. 522*
población *pág. 514*
potencial biótico *pág. 514*
presa *pág. 522*
resistencia ambiental *pág. 514*
tabla de vida *pág. 525*
transición demográfica *pág. 528*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Define *potencial biótico* y *resistencia ambiental*.

Traza la curva de crecimiento de una población antes de que ésta encuentre una resistencia ambiental significativa. ¿Cómo se llama este tipo de crecimiento y cuál es su característica distintiva?

Explica la diferencia entre las formas de resistencia ambiental independientes de la densidad y las dependientes de la densidad.

4. ¿Qué significa crecimiento demográfico logístico? ¿Qué es *K*?
5. Describe tres posibles consecuencias si una población excede su capacidad de carga. Explica tu respuesta.
6. Menciona tres formas de resistencia ambiental dependientes de la densidad y explica el porqué de la dependencia de cada una de ellas.

7. Explica la diferencia entre las poblaciones que presentan curvas de supervivencia cóncavas y convexas.
8. Elabora la forma general de los diagramas de estructura de edades característicos de poblaciones en crecimiento, estables y que disminuyen. Rotula todos los ejes y explica por qué es posible predecir el crecimiento futuro a corto plazo usando la estructura de edades actual de las poblaciones.
9. Dado que el índice de natalidad de Estados Unidos corresponde actualmente a la fertilidad en el nivel de reposición, ¿por qué crece la población de ese país?
10. Comenta algunas de las razones por las que puede ser económicamente difícil la transición de una población en crecimiento a una población estable.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Explica la selección natural en términos del potencial biótico y la resistencia ambiental.
2. Estados Unidos ha aceptado desde hace mucho tiempo a un gran número de inmigrantes. Comenta los pros y los contras de tener un alto índice de inmigración legal. ¿Cuáles son las implicaciones de la inmigración con respecto a la estabilización de la población?
3. ¿Qué factores alientan el rápido crecimiento demográfico en los países en desarrollo? ¿Qué se necesitará para que ese crecimiento cambie?
4. Contrasta las estructuras de edades de las poblaciones humanas en rápido crecimiento y las estables. ¿Por qué una población en rápido aumento continuaría creciendo incluso si todas las familias inmediatamente empiezan a tener sólo dos hijos? ¿Por cuánto tiempo se incrementaría la población?
5. ¿Por qué resulta difícil aplicar el concepto de capacidad de carga a las poblaciones humanas?
6. Busca en Internet "huella ecológica" y calcula tu propia huella usando el cuestionario que encuentres en alguno de los sitios Web resultantes. Para cinco de tus actividades cotidianas, explica cómo y por qué cada una contribuye con tu huella ecológica.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Cohen, J. "Human Population Grows Up". *Scientific American*, septiembre de 2005. Los cambios masivos están en reserva cuando las poblaciones humanas se incrementan.

Korpimaki, E. y Krebs, C. J. "Predation and Population Cycles of Small Mammals". *BioScience*, noviembre de 1996. Reseña de estudios recientes destinados a evaluar los ciclos de depredadores y sus presas.

Myers, N. "Biotic Holocaust". *International Wildlife*, marzo-abril de 1999. Las actividades humanas están provocando extinciones de especies sin precedente desde la desaparición de los dinosaurios. ¿Cómo podemos revertir esta tendencia?

Pauly, D. y Watson, R. "Counting the Last Fish". *Scientific American*, julio de 2003. La pesca en exceso está provocando el colapso de las pesquerías mundiales.

Potts, M. "The Unmet Need for Family Planning". *Scientific American*, enero de 2000. Para reducir el crecimiento demográfico y mejorar la calidad de vida, es necesario un mayor acceso a los anticonceptivos en los países en desarrollo.

Wackernagel, M. *et al*. "Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, julio de 2002. Una evaluación innovadora y conservadora de la huella ecológica humana sugiere que ya hemos rebasado la capacidad de la Tierra para sustentar nuestra población con los estándares de vida actuales.

Wilson, E. O. "The Bottleneck". *Scientific American*, febrero de 2002. La explosión demográfica combinada con la disminución de los recursos crea un cuello de botella para la humanidad. Este fascinante artículo de un biólogo galardonado tanto con el Premio Nacional de Ciencias como con el Pulitzer compara puntos de vista ambientales y económicos.

CAPÍTULO 27

Interacciones de la comunidad

Un trabajador lanza chorros de agua caliente a los mejillones cebra que recubren el interior de una planta de tratamiento de agua en Michigan. (Imagen en recuadro) Mejillones cebra cubren el cuerpo de un cangrejo de río.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: La invasión del mejillón cebra

27.1 ¿Por qué son importantes las interacciones de la comunidad?

27.2 ¿Cuál es la relación entre el nicho ecológico y la competencia?

El nicho ecológico define el lugar y el papel de cada especie en su ecosistema

La competencia ocurre siempre que dos organismos intentan utilizar los mismos recursos limitados

Las adaptaciones reducen la superposición de nichos ecológicos entre especies que coexisten

La competencia interespecífica contribuye a regular el tamaño de la población y la distribución de cada especie

La competencia dentro de una especie es un factor primordial en el control del tamaño de la población

27.3 ¿Cuáles son los resultados de las interacciones entre los depredadores y sus presas?

Las interacciones entre depredador y presa moldean las adaptaciones evolutivas

Guardián de la Tierra: Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad

27.4 ¿Qué es la simbiosis?

El parasitismo daña, pero no mata de inmediato al huésped

En las interacciones mutualistas ambas especies obtienen beneficios

Investigación científica: Hormigas y acacias: una asociación ventajosa

27.5 ¿Cómo influyen las especies clave en la estructura de la comunidad?

27.6 Sucesión: ¿Cómo cambia una comunidad a través del tiempo?

Existen dos formas principales de sucesión: primaria y secundaria

También hay sucesión en los estanques y lagos

La sucesión culmina en la comunidad clímax

Algunos ecosistemas se mantienen en un estado de subclímax

Conexiones evolutivas: ¿El camuflaje es capaz de dividir una especie?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La invasión del mejillón cebra

ESTUDIO DE CASO LA INVASIÓN DEL MEJILLÓN CEBRA

EN 1989 LOS RESIDENTES DE MONROE, MICHIGAN, una población situada a orillas del lago Erie, se encontraron de pronto sin agua. Sus escuelas, industrias y negocios tuvieron que cerrar durante dos días mientras los trabajadores intentaban resolver el problema: los mejillones cebra habían obstruido la planta de tratamiento de agua. Su problema no era el único de este tipo; en otra planta de tratamiento situada en el lago Erie, las poblaciones de mejillón cebra alcanzaron la cifra de 720,000 por metro cuadrado (véase la fotografía de presentación del capítulo). ¿De dónde vinieron los mejillones?

En algún momento de 1985 o 1986, un barco mercante que venía de Europa descargó agua dulce en el lago Saint Clair, que se localiza entre el lago Hurón y el lago Erie, en la frontera entre Ontario y Michigan. El agua, que se utilizó como lastre durante la travesía transatlántica del barco, llevaba polizones: millones de larvas de mejillón cebra. Aunque estos moluscos son nativos de los mares Caspio y Negro (dos grandes mares interiores entre Europa y Asia), encontraron condiciones ideales en Norteamérica. Dispersándose a través de los Grandes Lagos y los sistemas de desagüe de los ríos Mississippi y Ohio, han llegado hasta Nueva Orleans en el sur y Oklahoma en el oeste.

Las corrientes arrastran las larvas microscópicas del mejillón a lo largo de cientos de kilómetros. Mediante fibras pegajosas, los adultos, de dos a tres centímetros de largo, se adhieren a casi cualquier superficie subacuática, como muelles, tubos, maquinaria, escombros, cascos de barcos e incluso arena y sedimentos. Como sobreviven varios días fuera del agua, los mejillones adheridos a botes pequeños pueden llegar a otros lagos y ríos, donde rápidamente se establecen. La hembra adulta produce hasta 100,000 huevecillos cada año, de manera que la amenaza del mejillón ha probado ser incontenible. Los mejillones cubren y extinguen otras especies de crustáceos, por lo que amenazan con provocar la desaparición de muchas variedades poco comunes. Piensa en el mejillón cebra conforme leas acerca de las interacciones de la comunidad que caracterizan a los ecosistemas saludables. ¿Por qué han tenido tanto éxito estos invasores? ¿Habrá algo capaz de contener su propagación?

27.1 ¿POR QUÉ SON IMPORTANTES LAS INTERACCIONES DE LA COMUNIDAD?

Una **comunidad** ecológica se compone de todas las poblaciones que interactúan dentro de un ecosistema; en otras palabras, una comunidad es el componente *biótico*, o animado, de un ecosistema. En el capítulo anterior vimos que las interacciones en la comunidad, como la depredación, el parasitismo y la competencia, contribuyen a limitar el tamaño de las poblaciones. La red de interacciones entre los seres vivos que constituyen una comunidad tiende a mantener un equilibrio entre los recursos y el número de individuos que los consumen. Cuando las poblaciones interactúan unas con otras e influyen en la capacidad de cada una para sobrevivir y reproducirse, sirven como agentes de selección natural. Por ejemplo, al matar las presas más fáciles de atrapar, los *depredadores* dejan vivos a los individuos con mejores defensas contra la depredación. Estos individuos engendran un mayor número de crías y con el tiempo sus características hereditarias llegan a predominar en la población de presas. De esta forma, al mismo tiempo que limitan el tamaño de las poblaciones, las interacciones en la comunidad moldean el cuerpo y el comportamiento de las poblaciones que interactúan. Este proceso, por el que dos especies que interactúan fungen como agentes de selección natural una respecto a la otra a lo largo del tiempo evolutivo se conoce como **coevolución**.

Las interacciones de la comunidad más importantes son la competencia, la depredación, el parasitismo y el mutualismo. Si suponemos que en cada una de estas interacciones participan dos especies, los tipos de interacciones se caracterizarán en función de si cada especie resulta perjudicada o beneficiada, como se muestra en la tabla 27-1. Estas interacciones han moldeado el cuerpo y el comportamiento de los organismos.

27.2 ¿CUÁL ES LA RELACIÓN ENTRE EL NICHO ECOLÓGICO Y LA COMPETENCIA?

El nicho ecológico define el lugar y el papel de cada especie en su ecosistema

El concepto de *nicho ecológico* es importante para comprender cómo la competencia entre especies y dentro de cada una selecciona las adaptaciones en la forma del cuerpo y el comportamiento. Si bien la palabra *nicho* nos hace pensar en un pequeño espacio cerrado, en ecología su significado es mucho más amplio. Cada especie ocupa un **nicho ecológico** único que abarca todos los aspectos de su forma de vida. Un nicho ecológico incluye el hogar físico o *hábitat* del organismo. El hábitat primario del ciervo de cola blanca, por ejemplo, es el bosque caducifolio oriental. Además, el nicho incluye todos los factores ambientales físicos necesarios para la supervivencia y reproducción del ciervo, como los sitios de crianza y las guaridas, los intervalos de temperatura en los que el organismo sobrevive, la cantidad de humedad que requiere, el pH del agua o del suelo donde puede habitar, el tipo de nutrimentos del suelo que le hacen falta y el grado de sombra que tolera. El nicho ecológico comprende todo el "papel" que una especie dada desempeña dentro de un ecosistema, incluyendo lo que come (o consume, si es que obtiene energía a partir de la fotosíntesis) y las demás especies con las que compite. Aunque los diversos tipos de organismos comparten muchos aspectos de su nicho con otros, no hay dos especies que ocupen exactamente el mismo nicho ecológico, como se explicará en los siguientes apartados.

Tabla 27-1 Interacciones entre organismos

Tipo de interacción	Efecto sobre el organismo A	Efecto sobre el organismo B
Competencia entre A y B	Daña	Daña
Depredación de A contra B	Beneficia	Daña
Simbiosis		
Parasitismo de A en B	Beneficia	Daña
Comensalismo de A con B	Beneficia	No tiene efecto
Mutualismo entre A y B	Beneficia	Beneficia

La competencia ocurre siempre que dos organismos intentan utilizar los mismos recursos limitados

La **competencia** es una interacción que ocurre entre individuos o especies que intentan utilizar los mismos recursos limitados, en especial, energía, nutrimentos o espacio. La **competencia interespecífica** describe las interacciones competitivas entre diferentes especies, que podrían utilizar fuentes similares de alimento o los mismos lugares de crianza, o bien, competir por lugares con luz. En la competencia interespecí-

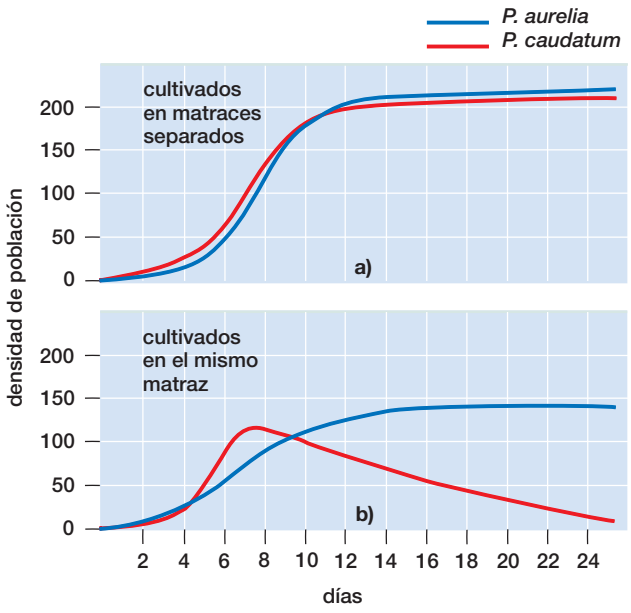


FIGURA 27-1 Exclusión competitiva
a) Cultivados por separado con una provisión de alimento constante, tanto el *Paramecium aurelia* como el *P. caudatum* presentan la curva S característica de una población que inicialmente crece con rapidez y después se estabiliza. ***b)*** Cultivados juntos y obligados a ocupar el mismo nicho, el *P. aurelia* supera siempre en la competencia al *P. caudatum* y provoca la muerte gradual de esa población. (Reproducido con modificación de G. F. Gause, *The Struggle for Existence*, Baltimore: Williams & Wilkins, 1934). PREGUNTA: Explica cómo la exclusión competitiva podría contribuir a la amenaza que suponen las especies invasoras.

fica cada especie participante sufre daños porque se reduce el acceso a los recursos cuyo suministro es limitado. La intensidad de la competencia interespecífica depende del grado de similitud entre las necesidades de las dos especies. En otras palabras, el grado de competencia es proporcional a la magnitud de la superposición de los nichos ecológicos de las especies en competencia.

Las adaptaciones reducen la superposición de nichos ecológicos entre especies que coexisten

Del mismo modo que dos organismos cualesquiera no pueden ocupar exactamente el mismo espacio físico al mismo tiempo, tampoco dos especies pueden habitar en el mismo nicho ecológico de forma simultánea y continua. Este importante concepto, que suele designarse como el **principio de exclusión competitiva**, fue formulado en 1934 por el microbiólogo ruso G. F. Gause. Este principio conduce a la hipótesis de que si se pusieran juntas dos especies con el mismo nicho y se les obligara a competir por recursos limitados, inevitablemente una de ellas vencería a la otra en la competencia y la especie menos adaptada de las dos se extinguiría. Gause utilizó dos especies del protista *Paramecium* (*P. aurelia y P. caudatum*) para demostrar este principio. En matraces de laboratorio ambas especies prosperaban a partir de bacterias y se alimentaban en las mismas partes de los matraces. Cultivadas por separado, ambas poblaciones proliferaban (**FIGURA 27-1a**), pero cuando Gause ponía las dos especies juntas en un mismo matraz, una de ellas siempre eliminaba, o "excluía competitivamente", a la otra (**FIGURA 27-1b**). Gause repitió entonces el experimento sustituyendo al *P. caudatum* por otra especie, *P. bursaria,* que tendía a alimentarse en otra parte del matraz. En este caso, las dos especies de *Paramecium* pudieron coexistir por tiempo indefinido porque ocupaban nichos ligeramente distintos. Las especies invasoras, como los mejillones cebra, tienen nichos que se superponen significativamente con los de las especies nativas, como las almejas de agua dulce, con las que son capaces de competir. Para conocer más acerca de las especies invasoras, véase la sección "Guardián de la Tierra: Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad".

El ecologista R. MacArthur puso a prueba en condiciones naturales lo que Gause descubrió en el laboratorio, para lo cual investigó cinco especies de sílvidos norteamericanos. Todas estas aves cazan insectos y anidan en el mismo tipo de árbol llamado picea. Aunque en apariencia los nichos de estas aves se traslapan considerablemente, MacArthur encontró que cada especie concentra su búsqueda en zonas específicas del árbol, emplea diferentes tácticas de caza y anida en épocas ligeramente distintas. Al *dividirse* los recursos que proveen las piceas que comparten, los sílvidos reducen al mínimo la superposición de sus nichos y aminoran la competencia entre las diversas especies (**FIGURA 27-2**).

MacArthur descubrió que, cuando coexisten dos especies con necesidades similares, por lo regular, cada una ocupa un nicho más pequeño que el que ocuparía si estuviera sola. Este fenómeno, llamado **partición de recursos**, es una adaptación evolutiva que reduce los efectos perjudiciales de la competencia interespecífica. La partición de recursos es el resultado de la coevolución de especies con una superposición extensa, pero no total, de nichos. Puesto que la selección natural favorece

FIGURA 27-2 Partición de recursos
Cada una de estas especies insectívoras de sílvidos norteamericanos busca alimento en diferentes zonas de las piceas. Al ocupar nichos similares, pero no idénticos, se reduce la competencia.

a los individuos con menos competidores, a lo largo del tiempo evolutivo las especies en competencia desarrollan adaptaciones físicas y de comportamiento que reducen al mínimo sus interacciones competitivas. Darwin descubrió un ejemplo sorprendente de partición de recursos entre los pinzones de las islas Galápagos. Los pinzones que compartían la misma isla desarrollaron distintos tamaños y formas de pico y diferentes comportamientos de alimentación, lo que redujo la competencia entre ellos (como se describe en el capítulo 16).

La competencia interespecífica contribuye a regular el tamaño de la población y la distribución de cada especie

Aunque la selección natural reduce la superposición de nichos entre individuos de especies diferentes, los que tienen nichos similares siguen compitiendo directamente por los recursos limitados. Esta competencia interespecífica puede restringir el tamaño y la distribución de las poblaciones en competencia.

Un estudio clásico de los efectos de la competencia interespecífica es el que llevó a cabo el ecologista J. Connell con percebes (los percebes son unos crustáceos que se adhieren permanentemente a las rocas y a otras superficies; las rocas de la figura 27-14a están cubiertas de percebes grises). Los percebes del género *Chthamalus* comparten los litorales rocosos de Escocia con otro género, *Balanus,* y sus nichos se traslapan considerablemente. Ambos géneros viven en la **zona intermareal (o zona intermareas)**, una zona de la costa a la que las mareas cubren y dejan al descubierto alternativamente. Connell encontró que *Chthamalus* domina la marea alta y *Balanus*, la marea baja. Cuando Connell retiró todos los *Balanus,* la población de *Chthamalus* aumentó y se diseminó más abajo, hacia la zona que antes habitara su competidor. Donde el hábitat es idóneo para ambos géneros, *Balanus* vence porque es más grande y crece con más rapidez. Pero *Chthamalus* tolera las condiciones de mayor sequedad, por lo que goza de una ventaja competitiva en la marea alta, donde sólo la pleamar sumerge a los percebes. Como lo ilustra este ejemplo, la competencia interespecífica limita tanto el tamaño como la distribución de las poblaciones en competencia.

La competencia dentro de una especie es un factor primordial en el control del tamaño de la población

En esencia, individuos de la misma especie tienen requerimientos idénticos de recursos y, por lo tanto, ocupan exactamente el mismo nicho ecológico. Por esta razón, la competencia intraespecífica —o competencia entre individuos de la misma especie— es la forma más intensa de competencia. Como se explicó en el capítulo 26, la **competencia intraespecífica** ejerce una fuerte resistencia ambiental dependiente de la densidad, limitando el tamaño de la población. El resultado evolutivo de la competencia interespecífica es que los individuos que están mejor adaptados para obtener los recursos escasos tienen mayor probabilidad de reproducirse exitosamente, transmitiendo sus rasgos a la descendencia.

27.3 ¿CUÁLES SON LOS RESULTADOS DE LAS INTERACCIONES ENTRE LOS DEPREDADORES Y SUS PRESAS?

Los depredadores se alimentan de otros organismos que matan con ese propósito. Los ecologistas incluyen a veces los animales **herbívoros** (aquellos que comen plantas) en esta categoría general, porque pueden tener una influencia importante en el tamaño y la distribución de las poblaciones de plantas. Definiremos la depredación en su sentido más amplio, de forma que incluya la pika que se alimenta de pasto (FIGURA 27-3a), el mejillón cebra que filtra el agua para obtener algas microscópicas, el pez gobio que se come al mejillón cebra y el murciélago que se lanza sobre una palomilla (FIGURA 27-3b). Casi todos los depredadores son más grandes que sus presas o cazan colectivamente, como hacen los lobos para derribar un alce (véase la figura 26-10). En general, los depredadores son menos abundantes que sus presas; conoceremos la razón de ello en el capítulo siguiente.

a) b)

FIGURA 27-3 Algunas formas de depredación

Una pika, cuyo alimento predilecto es el pasto, es un pariente de pequeñas dimensiones del conejo y vive en las montañas Rocallosas. Los fuertes tallos del pasto han evolucionado bajo la presión del comportamiento depredatorio de los herbívoros. ***b)*** Un murciélago de orejas largas utiliza un refinado sistema de ecolocación para cazar palomillas, las cuales, por su parte, han desarrollado detectores de sonido y comportamientos especiales para evitar al murciélago. PREGUNTA: Describe algunos otros ejemplos de coevolución entre depredadores y presas.

BIOÉTICA

Las **especies invasoras** son especies introducidas en un ecosistema donde no evolucionaron y que resultan dañinas para la salud humana, el ambiente o la economía de la región. Las especies invasoras a menudo se dispersan profusamente porque encuentran algunas formas de resistencia ambiental, como depredadores o parásitos, en su nuevo ambiente. El crecimiento sin control de las poblaciones de tales especies puede dañar seriamente el ecosistema conforme éstas se desplazan, salen victoriosas de la competencia y se convierten en depredadores de las especies locales. No todas las especies no nativas se convierten en plaga, sino sólo aquellas que tienen elevadas tasas de reproducción, medios efectivos para desenvolverse en los nuevos hábitat y la capacidad de prosperar en una amplia variedad de condiciones ambientales. Las plantas invasoras se esparcen por medio de tallos rastreros así como por semillas, y algunas incluso pueden dar origen a nuevas plantas a partir de fragmentos. Los animales invasores por lo general no son caprichosos para comer. Al evadir los controles y equilibrios impuestos por miles de años de coevolución, las especies invasoras están provocando la devastación en ecosistemas naturales de todo el mundo.

Tanto los estorninos como los gorriones ingleses se han diseminado profusamente desde su introducción deliberada en la zona oriental de Estados Unidos en la década de 1890. Su éxito ha dañado a algunas aves canoras nativas, como los azulejos, con los que compiten por sitios de anidación. Las pequeñas hormigas de fuego de Sudamérica fueron introducidas accidentalmente en Alabama junto con la madera que llegó por barco en la década de 1930 y, desde entonces, se han esparcido por todo el sur de Estados Unidos. Las hormigas de fuego matan hormigas, pájaros y jóvenes reptiles nativos. Sus montículos arruinan los campos de las granjas, y sus fuertes picaduras y temperamento agresivo pueden hacer inhabitables los patios traseros de las casas. El escarabajo asiático de cuernos largos, que llegó alrededor de 1996 en estructuras y cajas de madera procedentes de China, ahora está devorando árboles de madera dura en el este y la zona central norte de Estados Unidos.

Las plantas invasoras también amenazan las comunidades naturales. En la década de 1920, la planta trepadora kudzu de Japón se plantó extensivamente en el sur de Estados Unidos para controlar la erosión. En la actualidad el kudzu se ha convertido en una plaga al crecer desmesuradamente y matar árboles y maleza; en ocasiones también llega a invadir el exterior de casas pequeñas (**FIGURA E27-1a**). El jacinto acuático, importado desde Sudamérica como planta ornamental, ahora cubre unos 2 millones de acres de lagos y canales en el sur de Estados Unidos, entorpeciendo la navegación y desplazando la vegetación natural (**FIGURA E27-1b**). La salicaria púrpura, introducida como planta ornamental a principios del siglo XIX, invadió pantanos, donde desplaza a las plantas nativas y reduce tanto el alimento como el hábitat para los animales locales (**FIGURA E27-1c**).

Un invasor microscópico, el virus del Nilo Occidental, se reconoció por primera vez en Estados Unidos en 1999, cuando los cuervos comenzaron a morir en gran número en Nueva York. El virus se reproduce en las aves, las cuales lo transmiten al ser picadas por mosquitos; luego, éstos infectan a otras aves, seres humanos y algunos otros mamíferos, incluidos los caballos. Las aves, los caballos y los humanos en Estados Unidos carecen de la inmunidad que resulta de una prolongada exposición al virus, por lo que son más vulnerables que las poblaciones de África y el Medio Oriente, donde el virus es común.

Los ecologistas estiman que los miles de especies invasoras en Estados Unidos son responsables de reducir las poblaciones de unas 400 especies nativas hasta el grado de que se les considere seriamente amenazadas o en peligro de extinción. Recientemente, funcionarios encargados del cuidado de la vida silvestre hicieron cuidadosos intentos por restablecer estos controles y equilibrios importando depredadores o parásitos para atacar algunas especies invasoras. Sin embargo, este tipo de control entraña serios peligros, porque introducir más depredadores o parásitos no nativos en un ecosistema podría tener consecuencias impredecibles y posiblemente desatrosas para las especies locales. Por ejemplo, en 1958 un enorme caracol depredador de Florida, el caracol lobo rosado, fue llevado a Hawai para alimentarse de otra plaga invasora, el caracol gigante de África. El caracol lobo rosado se ha convertido en una seria amenaza para varias especies de caracoles nativos de Hawai, que ahora se encuentran en peligro de extinción.

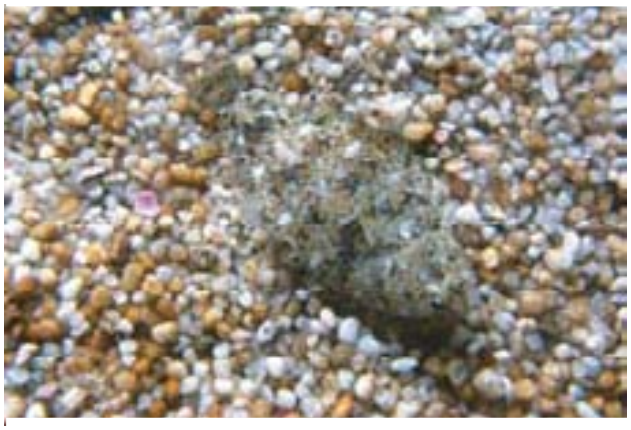
A pesar de los riesgos de importar estos organismos de control biológico, a menudo parece haber pocas alternativas, porque los venenos matan organismos nativos y no nativos indiscriminadamente. Aprendiendo de los desastres del pasado, los biólogos ahora analizan minuciosamente los *biocontroles* propuestos para asegurarse de que combaten de manera específica las especies invasoras. Por ejemplo, una pequeña mosca de Sudamérica, cuyas larvas se alimentan selectivamente de las hormigas de fuego, se ha liberado en el sur de Estados Unidos. Los científicos están investigando la posibilidad de importar otros insectos que se alimentan de plantas invasoras —como el kudzu y la salicaria púrpura— sin atacar a las plantas nativas.

a) kudzu

b) jacinto acuático

c) salicaria púrpura

FIGURA E27-1 Especies invasoras
a) El kudzu japonés cubre rápidamente árboles enteros y hasta casas. ***b)*** El jacinto acuático, originario de Sudamérica, actualmente obstruye canales en el sur de Estados Unidos. ***c)*** La salicaria púrpura desplaza la vegetación nativa y reduce el alimento y el hábitat para los animales locales en los pantanos.



a) lenguado de la arena (pez)

b) chotacabras (pájaro)

FIGURA 27-4 Camuflaje por combinación
a) Este lenguado de la arena es un pez oceánico aplanado que habita en el fondo del mar y tiene una coloración moteada muy parecida a la arena sobre la que reposa. ***b)*** Este chotacabras de Belice en su nido se distingue con dificultad de la hojarasca que lo rodea.

a) palomilla

b) dragón de mar frondoso

c) bichos espina

d) cactus

FIGURA 27-5 Camuflaje por semejanza con objetos específicos
a) Unas palomillas, cuyo color y forma son semejantes a los del excremento de las aves, reposan inmóviles sobre una hoja. ***b)*** El dragón de mar frondoso (un "caballito de mar" australiano) tiene extensiones de su cuerpo que imitan las algas entre las que normalmente se oculta. ***c)*** Los bichos espina de Florida pasan desapercibidos por su semejanza con las espinas de una rama. ***d)*** Este cactus del sudoeste de Estados Unidos recibe acertadamente el nombre de "cactus roca viva". PREGUNTA: ¿Cómo se desarrolló tal camuflaje?

Las interacciones entre depredador y presa moldean las adaptaciones evolutivas

Para sobrevivir, los depredadores deben alimentarse y las presas deben evitar servir de alimento. Por consiguiente, las poblaciones de depredadores y presas ejercen una intensa presión ambiental mutua que da por resultado su coevolución. Conforme las presas resultan más difíciles de atrapar, los depredadores deben volverse más hábiles para la caza. La coevolución ha dotado al puma de garras y colmillos filosos, y al cervatillo de un pelaje moteado y el comportamiento de yacer completamente inmóvil mientras espera a su madre. La coevolución ha dado origen a la aguda visión del halcón y a la coloración parda, semejante a la de la tierra, de los mamíferos que son sus presas. La evolución que se genera bajo la presión de los depredadores también ha producido los venenos y brillantes colores de la rana flecha venenosa y la serpiente coralillo (véase las figuras 27-7 y 27-9a). En los siguientes apartados examinaremos algunos de los resultados evolutivos de las interacciones entre depredadores y presas. En la sección "Guardián de la Tierra: Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad", aprenderás lo que sucede cuando los controles y equilibrios naturales son esquivados al introducir organismos en comunidades ecológicas en las que no evolucionaron.

Algunos depredadores y presas han adoptado comportamientos que se contrarrestan

Las adaptaciones de los murciélagos y las palomillas (véase la figura 27-3) ofrecen un excelente ejemplo de cómo la coevolución moldea tanto las estructuras físicas como los comportamientos. En su mayoría, los murciélagos son cazadores nocturnos que se orientan y localizan presas por ecolocación. Estos animales emiten pulsaciones sonoras de frecuencia extremadamente alta y gran intensidad y, mediante el análisis de los ecos que regresan a ellos, crean una "imagen" de su entorno. Por la presión selectiva de este sistema especializado de localización de presas, ciertas palomillas (una presa favorita de los murciélagos) han perfeccionado unos oídos simples que son especialmente sensibles a las frecuencias que los murciélagos ecolocalizadores utilizan. Cuando escuchan a un murciélago, estas palomillas intentan escapar volando de forma errática o dejándose caer al suelo. Los murciélagos pueden contrarrestar esta defensa llevando la frecuencia de sus pulsaciones sonoras fuera del intervalo de sensibilidad de la palomilla. Algunas palomillas han perfeccionado un método para interferir la ecolocación de los murciélagos produciendo sus propios chasquidos de alta frecuencia. En respuesta a esto, cuando caza una palomilla chasqueante, el murciélago puede interrumpir temporalmente sus propias pulsaciones sonoras y hacer blanco en la polilla siguiendo los chasquidos de ésta.

El camuflaje oculta tanto a los depredadores como a sus presas

Una antigua máxima de las novelas de detectives dice que el mejor lugar para esconderse es el que está justo a la vista de todo el mundo. Tanto los depredadores como sus presas han adoptado colores, dibujos y formas parecidos a su entorno. Estos disfraces, llamados **camuflaje**, hacen que los animales pasen desapercibidos aun a la vista de todos (**FIGURA 27-4**).

Algunos animales muestran un gran parecido con objetos específicos, como hojas, ramitas, algas marinas, espinas o incluso excrementos de aves (**FIGURA 27-5a-c**). Los animales camuflados tienden a permanecer inmóviles en vez de huir de sus depredadores; ¡un "excremento de pájaro" que huye sería muy notorio! En tanto que muchos animales camuflados parecen plantas, algunos tipos de plantas han evolucionado hasta parecer rocas, que sus depredadores herbívoros ignoran (**FIGURA 27-5d**).

El camuflaje también ayuda a los depredadores que acechan a su presa. Por ejemplo, un guepardo manchado pasa desapercibido en la hierba mientras vigila a los mamíferos que pastan. El pez rana se parece mucho a las rocas y esponjas cubiertas de algas sobre las que reposa inmóvil, con un señuelo que se alza de su labio superior (**FIGURA 27-6**). Los peces pequeños advierten sólo el señuelo, y el pez rana los traga cuando se acercan a él.

a) guepardo

b) pez rana

FIGURA 27-6 El camuflaje ayuda a los depredadores

a) Mientras acecha a sus presas, el guepardo se confunde con el fondo de los pastizales. ***b)*** Combinando el camuflaje con el mimetismo agresivo, un pez rana aguarda emboscado; su cuerpo camuflado armoniza con la roca incrustada de esponjas sobre la que reposa. El señuelo atrae a depredadores pequeños que terminan convertidos en presas.

FIGURA 27-7 Coloración de advertencia
La rana flecha venenosa sudamericana anuncia que su piel es venenosa con motivos de colores brillantes y contrastantes.

Los colores brillantes suelen ser una advertencia de peligro

Ciertos animales han evolucionado de forma muy diferente y exhiben una **coloración de advertencia** (FIGURA 27-7; véase también las figuras 27-8 y 27-9). Estos animales tienen por lo regular un sabor desagradable y muchos de ellos son venenosos, como la avispa común, con sus bandas de color amarillo brillante y negro. Como para la presa no es ningún consuelo envenenar al depredador después de que éste se la ha comido, los colores brillantes proclaman "¡si me comes, te arriesgas!" Una sola experiencia desagradable basta para enseñar a los depredadores a evitar esas notorias presas.

Algunos organismos se protegen por mimetismo

El término **mimetismo** se refiere a una situación en la que una especie evoluciona hasta parecerse a otro organismo. Al compartir colores de advertencia similares, algunas especies venenosas se benefician. El mimetismo entre diferentes especies de sabor desagradable se llama *mimetismo mülleriano*. Por ejemplo, las mariposas monarca tienen dibujos en sus alas que son notablemente similares a los que presentan las mariposas virrey, que son de sabor igualmente desagradable (y casi indistinguible) (FIGURA 27-8). Las aves que enferman por comer un ejemplar de algunas de esas especies también evitarán a las mariposas de la otra especie. Un sapo que recibe una picadura mientras intenta comer una abeja probablemente evitará en el futuro no sólo a las abejas, sino a cualquier insecto con franjas negras y amarillas —como los avispones venenosos y las avispas— aun sin haberlo probado. Un patrón de coloración común da por resultado un aprendizaje más rápido por parte de los depredadores y, en consecuencia, menor depredación sobre todas las especies con colores similares.

Una vez que evoluciona una coloración de advertencia, surge una ventaja selectiva para los animales inofensivos que se parecen a los venenosos, una adaptación que se llama *mimetismo batesiano*. Por ejemplo, la inofensiva mosca de las flores escapa a la depredación pareciéndose a la abeja (FIGURA 27-9a), mientras que la inofensiva serpiente rey de las montañas evita a sus depredadores adoptando los brillantes colores de advertencia propios de la mortífera coralillo (FIGURA 27-9b).

Ciertas especies de presas utilizan otra forma de mimetismo: la **coloración de sobresalto**. Varios insectos, e incluso algunos vertebrados como la rana de ojos falsos, han adquirido por evolución motivos coloreados muy parecidos a los ojos de un animal mucho más grande y posiblemente peligroso (FIGURA 27-10). Si un depredador se acerca, la presa exhibe de improviso sus manchas que parecen ojos, con lo que sobresalta al depredador y tiene oportunidad de escapar. Una variante refinada del tema de las presas que imitan a sus depredadores es la que se observa en la mosca de la baya de nieve, que es objeto de caza por parte de la araña saltadora territorial. Cuando una mosca advierte la presencia de una araña que se aproxima, extiende sus alas y las mueve hacia atrás y adelante en una danza de saltitos. Al ver esta exhibición, es probable que la araña huya de la inofensiva mosca. ¿Por qué? Los investigadores han observado que las marcas de las alas de la mosca se parecen mucho a las patas de otra araña saltadora.

mariposa monarca (sabor desagradable)

mariposa virrey (sabor desagradable)

FIGURA 27-8 Mimetismo de advertencia
Los colores de advertencia casi idénticos protegen tanto a la mariposa monarca de sabor desagradable (izquierda) como a la mariposa virrey (derecha), de gusto igualmente repugnante.

a) abeja (venenosa)

mosca de las flores (inofensiva)

b) coralillo (venenosa)

serpiente rey (inofensiva)

FIGURA 27-9 **Mimetismo batesiano**
a) Una abeja, que es capaz de picar (izquierda), es imitada por la inofensiva mosca de las flores (derecha). ***b)*** La coloración de advertencia de la venenosa serpiente coralillo (izquierda) es imitada por la inofensiva serpiente rey (derecha).

a) rana de ojos falsos

b) palomilla pavo real

c) oruga de la mariposa cola de golondrina

FIGURA 27-10 **Coloración de sobresalto**
a) Cuando se siente amenazada, la rana de ojos falsos levanta las ancas para simular los ojos de un depredador más grande. ***b)*** La palomilla pavo real de Trinidad está bien camuflada, pero, si un depredador se acerca, la palomilla abre sus alas para mostrar unas manchas que parecen grandes ojos. ***c)*** El parecido de esta larva oruga de la mariposa cola de golondrina con una serpiente ahuyenta a sus depredadores. La cabeza de la oruga es la "nariz de la serpiente".

araña saltadora (depredador)

mosca de la baya de nieve (presa)

FIGURA 27-11 Una presa imita a su depredador
Cuando se aproxima una araña saltadora (izquierda), la mosca de la baya de nieve extiende sus alas para exhibir una figura que semeja patas de araña (derecha). La mosca intensifica el efecto ejecutando una danza de saltitos laterales que remeda el movimiento de las patas de una araña saltadora que defiende su territorio.

Los movimientos irregulares de la mosca remedan los que ejecuta una araña saltadora cuando expulsa a otra araña de su territorio (FIGURA 27-11). La selección natural ha armonizado con gran finura el comportamiento y la apariencia de la mosca para evitar que ésta sea víctima de las arañas saltadoras.

Algunos depredadores utilizan el mimetismo para atacar a sus presas

Algunos depredadores han desarrollado un **mimetismo agresivo**, una estrategia de "lobo con piel de oveja", que les permite incitar a su presa a acercarse. Por ejemplo, las luciérnagas hembra emiten destellos con un cierto ritmo, que es único para su especie, con el fin de atraer a los machos. Pero en una especie, las hembras en ocasiones imitan el patrón de destellos de una especie diferente para atraer machos que matan y comen. El pez rana (véase la figura 27-6b) no sólo está camuflado, sino que exhibe un tipo de mimetismo agresivo al hacer oscilar un poco arriba de su boca un señuelo que se retuerce y que semeja un pez pequeño. El pez rana se traga de inmediato al pez curioso atraído por el señuelo.

Algunos depredadores y presas toman parte en contiendas químicas

Tanto depredadores como presas emplean una variedad de sustancias químicas con fines de ataque y defensa. El veneno de las arañas y las serpientes, como la coralillo (véase la figura 27-9), cumple la función de paralizar las presas y también de disuadir a los depredadores. Muchas plantas producen toxinas defensivas. Por ejemplo, los lupinos, cuyas flores adornan tanto los jardines como los prados de las montañas, producen sustancias químicas, llamadas *alcaloides,*

espectacular de defensa química es el que ofrece el escarabajo bombardero. Como respuesta a la mordedura de una hormiga, el escarabajo deposita las secreciones de unas glándulas especiales en una cámara abdominal, donde ciertas enzimas catalizan una reacción química explosiva que lanza un chorro de líquido hirviente y tóxico contra el atacante (FIGURA 27-12a).

Las plantas y los herbívoros tienen adaptaciones coevolutivas

Aunque los hemos clasificado como depredadores, los herbívoros (animales que comen plantas) no se ubican claramente en alguna de las categorías que hemos utilizado. Cuando pastan, los caballos y las vacas arrancan y exterminan algunas hierbas, pero casi siempre actúan como una podadora de pasto que recorta, pero no mata las plantas. Como quiera que los clasifiquemos, los herbívoros ejercen una fuerte presión selectiva sobre las plantas para evitar ser devoradas. Las plantas han perfeccionado diversas adaptaciones químicas que disuaden a sus "depredadores" herbívoros. Muchas de ellas, como el cardo lechoso, sintetizan sustancias tóxicas y de sabor desagradable. A medida que las plantas perfeccionaban sustancias tóxicas para su defensa, ciertos insectos encontraron formas de eliminar la toxicidad de estas sustancias o incluso de utilizarlas. El resultado de todo esto es que prácticamente toda planta tóxica sirve de alimento al menos a un tipo de insecto. Por ejemplo, las mariposas monarca depositan sus huevecillos en el cardo lechoso; cuando sus larvas eclosionan, consumen la planta tóxica (FIGURA 27-12b). Las orugas no sólo toleran el veneno del cardo lechoso, sino que además lo almacenan en sus tejidos como defensa contra sus propios depredadores. Después de la metamorfosis, la mariposa monarca conserva la toxina almacenada (véase la figura 27-8).

Los pastos han incorporado sustancias silíceas (vítreas) duras en sus hojas, lo que las hace difíciles de masticar, salvo para los que cuentan con dientes grandes y fuertes. En una escala de tiempo evolutiva, los pastos endurecieron sus hojas para reducir el ataque de los depredadores, y los caballos adquirieron dientes más largos con cubiertas de esmalte más gruesas que resisten el desgaste.

a) escarabajo bombardero

b) oruga monarca

FIGURA 27-12 Guerra química
a) El escarabajo bombardero rocía un líquido tóxico caliente en respuesta a un pellizco en la pata. ***b)*** Una oruga monarca se alimenta del cardo lechoso, que contiene una potente toxina. PREGUNTA: ¿Por qué la oruga tiene rayas de colores brillantes?

27.4 ¿QUÉ ES LA SIMBIOSIS?

La **simbiosis**, que literalmente significa "vivir juntos", se define como una interacción estrecha entre organismos de especies diferentes durante un tiempo prolongado. Considerada en su sentido más amplio, la simbiosis incluye el *parasitismo*, el *mutualismo* y el *comensalismo*. Aunque una de las especies siempre saca provecho de las relaciones simbióticas, la segunda especie puede sufrir daño, recibir beneficios, o bien, no verse afectada. El **comensalismo** es una relación en la que una de las especies obtiene beneficios y la otra no se ve afectada relativamente. Los percebes que se adhieren a la piel de una ballena, por ejemplo, consiguen viajar gratuitamente a través de aguas ricas en nutrimentos sin dañar a la ballena. En el parasitismo y en el mutualismo, los participantes actúan uno sobre el otro como poderoso agente de selección natural, como se explicará en los siguientes apartados.

El parasitismo daña, pero no mata de inmediato al huésped

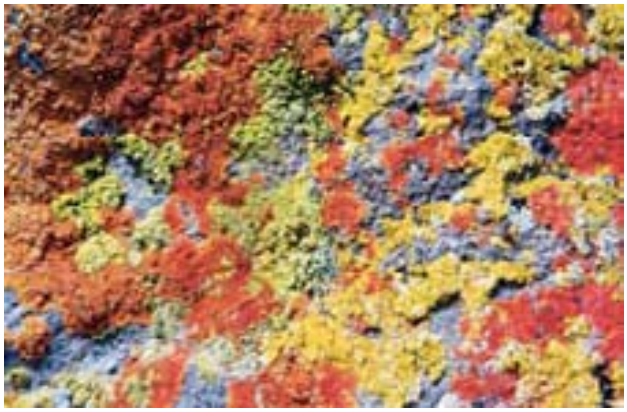
En el parasitismo un organismo obtiene la ventaja de alimentarse de otro. Los **parásitos** viven dentro de sus presas, llamadas *huéspedes*, o sobre ellas; normalmente las dañan o las debilitan, pero no las matan de inmediato. Aunque a veces es difícil distinguir con claridad entre un depredador y un parásito, los parásitos son en general mucho más pequeños y más numerosos que sus huéspedes. Entre los parásitos más conocidos están las tenias, las pulgas y numerosos protozoarios, bacterias y virus patógenos. Muchos parásitos, en particular los gusanos y los protozoarios (como el parásito de la malaria o paludismo), tienen ciclos de vida complejos en los que intervienen dos o más huéspedes. Hay unos cuantos vertebrados parásitos: la lamprea, que se adhiere a un pez huésped y chupa su sangre, es un ejemplo poco común.

La diversidad de las bacterias y virus infecciosos y la precisión del sistema inmunitario que contrarresta su ataque son evidencia de las poderosas fuerzas de la coevolución entre los microorganismos parásitos y sus huéspedes. Consideremos el caso del parásito del paludismo, que ha ejercido una fuerte presión ambiental en favor del gen de hemoglobina defectuoso de los seres humanos que provoca la anemia de células falciformes. El parásito no sobrevive en los glóbulos rojos afectados por esta enfermedad. En ciertas zonas de África, donde el paludismo es común, hasta 20 por ciento de la población humana tiene el gen de células falciformes.

Otro ejemplo es el *Trypanosoma*, un protozoario parásito que origina tanto la enfermedad del sueño en el ser humano como una enfermedad del ganado llamada *nagana.* Este parásito afecta relativamente poco al antílope africano, que coevolucionó con él. El ganado que no es nativo de África sufre la infección, pero sobrevive a ella si se crió en una región infestada durante varias generaciones. En cambio, el ganado recién importado muere por lo general si no recibe tratamiento.

En las interacciones mutualistas ambas especies obtienen beneficios

Cuando dos especies interactúan de forma que ambas obtienen provecho de ello, la relación recibe el nombre de **mutualismo**. Las manchas coloreadas que vemos sobre las rocas son probablemente líquenes, una asociación mutualista de un alga y



a) liquen

b) pez payaso

FIGURA 27-13 Mutualismo
a) Este liquen de brillantes colores que crece sobre la roca desnuda es una relación mutualista entre un alga y un hongo. ***b)*** El pez payaso se acomoda incólume entre los tentáculos urticantes de la anémona. Observa el brillante color "de advertencia" del pez payaso. Aunque el pez por sí solo es indefenso, su coloración advierte a los depredadores potenciales de la amenaza que supone la anémona.

un hongo (**FIGURA 27-13a**). El hongo brinda sostén y protección al mismo tiempo que obtiene alimento del alga fotosintética, cuyos brillantes colores son pigmentos que captan la luz. Las interacciones mutualistas también tienen lugar en el tracto digestivo de las vacas y de las termitas, donde protistas y bacterias encuentran alimento y abrigo al tiempo que ayudan a sus huéspedes a extraer nutrimentos, y en nuestros propios intestinos, donde las bacterias sintetizan ciertas vitaminas. Las bacterias nitrificantes que habitan en cámaras especiales sobre las raíces de las plantas leguminosas son otro ejemplo importante. Estas bacterias reciben alimento y abrigo de la planta y, a cambio, captan nitrógeno en una forma que la planta puede utilizar. Algunos socios mutualistas han coevolucionado al grado de que ninguno de ellos sobrevive por sí solo. Un ejemplo de esto es el mutualismo de hormigas y acacias que se describe en la sección "Investigación científica: Hormigas y acacias, una asociación ventajosa".

Las relaciones mutualistas en las que participan vertebrados son poco frecuentes y, por lo regular, menos íntimas y extendidas. El pez payaso, que está cubierto con una capa mucosa que le sirve de protección, se refugia entre los tentáculos venenosos de ciertas especies de anémonas. La anémona provee al pez protección de los depredadores. Por su parte, el pez payaso ahuyenta a otros peces que se alimentan de anémonas, limpia los desechos de su huésped y lleva un poco de alimento a su anémona (**FIGURA 27-13b**).

a)

b)

FIGURA 27-14 Especies clave
a) La estrella de mar *Pisaster* es una especie clave a lo largo del rocoso litoral noroeste del Pacífico.

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA — Hormigas y acacias: una asociación ventajosa

Daniel Janzen, estudiante de doctorado de la Universidad de Pensilvania, recorría a pie un camino de Veracruz, México, cuando vio un escarabajo volador que se posaba sobre un árbol espinoso, tan sólo para ser ahuyentado de él por una hormiga. Cuando se acercó, vio que el árbol, una acacia cuerno de toro, estaba cubierta de hormigas. Una gran colonia de hormigas del género *Pseudomymex* habitaba en la parte interna de las espinas agrandadas de la planta, cuyo interior blando y carnoso se extrae con facilidad para crear un refugio (**FIGURA E27-2**).

Con el fin de averiguar cuál es la importancia de las hormigas para el árbol, Janzen comenzó a quitar las espinas a mano hasta que encontró y arrancó la espina que alojaba a la hormiga reina, con lo cual destruyó la colonia. Más tarde, Janzen recurrió a métodos más eficientes, aunque peligrosos: utilizó un insecticida para eliminar todas las hormigas de un gran grupo de acacias. El veneno dejó intactas las acacias, Janzen enfermó por causa de él y todas las hormigas murieron. Menos de un año después de rociar el insecticida, Janzen encontró que todas las acacias habían muerto, consumidas por los insectos y otros herbívoros y faltas de sol debido a la sombra de otras plantas competidoras. En el terreno en torno a los árboles, que normalmente las hormigas mantenían podado, la vegetación había crecido demasiado. Al parecer, los árboles dependían de las hormigas residentes en ellos para su supervivencia.

Para saber si las hormigas podían sobrevivir lejos del árbol, Janzen retiró con cuidado todas las espinas habitadas por hormigas de 100 árboles de acacia, sufriendo numerosas picaduras mientras lo hacía. Janzen alojó cada colonia de hormigas en un frasco provisto de vegetación local distinta de las acacias y de insectos para servir de alimento. Todas las colonias de hormigas murieron de inanición. Al examinar detenidamente las acacias, Janzen encontró unas estructuras hinchadas llenas de jarabe dulce en la base de las hojas, así como unas cápsulas ricas en proteína en sus puntas (figura E27-2, imagen en recuadro). Estos dos materiales juntos proveen a las hormigas una dieta equilibrada.

Los experimentos de Janzen sugieren claramente que estas especies de hormigas y acacias tienen una relación mutualista obligada: ninguna de ellas sobrevive sin la otra. Desde luego, fueron necesarias más observaciones para respaldar esta hipótesis. El hecho de que las hormigas murieran de inanición en los frascos de Janzen no descarta la posibilidad de que sobrevivan satisfactoriamente en otro lugar; pero, de hecho, nunca se ha encontrado esta especie de hormigas llevando una vida independiente. De manera similar, nunca se ha visto una acacia cuerno de toro sin su colonia residente de hormigas. Fue así como una observación fortuita seguida de una investigación minuciosa permitió descubrir una importante asociación mutualista.

FIGURA E27-2 Una relación mutualista
Las hojas de ciertas acacias producen cápsulas amarillas ricas en proteína que se encuentran en sus puntas. Estas cápsulas sirven de alimento a las hormigas que residen en la planta. (Imagen en recuadro). Un agujero de la espina agrandada de la acacia cuerno de toro sirve de albergue a los integrantes de la colonia de hormigas. La hormiga que entra en la espina lleva una cápsula de alimento producida por la acacia. La colonia invade más espinas a medida que crece.

27.5 ¿CÓMO INFLUYEN LAS ESPECIES CLAVE EN LA ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD?

En algunas comunidades, una cierta especie, llamada **especie clave**, desempeña un papel fundamental en la determinación de la estructura de la comunidad, un papel desproporcionado en relación con su presencia en la comunidad. La eliminación de la especie clave altera drásticamente la comunidad. Por ejemplo, en 1969 Robert Paine, un ecologista de la Universidad de Washington, retiró las estrellas de mar depredadoras *Pisaster* (**FIGURA 27-14a**) de algunas secciones de la costa intermareal rocosa de Washington. Los mejillones, unos moluscos bivalvos que son una presa favorita de las estrellas , llegaron a ser tan abundantes que expulsaron por competencia a las algas y otros invertebrados que normalmente coexisten en las comunidades intermareales. Otro invertebrado marino, la langosta, es una especie clave cerca de la costa oriental de Canadá. La pesca excesiva de langosta permitió que los erizos, que son presa de la langosta, aumentaran en número. La explosión de la población de erizos de mar eliminó casi en su totalidad ciertos tipos de algas que les sirven de alimento y dejó grandes extensiones de roca desnuda donde alguna vez existió una comunidad muy variada. La nutria marina parece ser una especie clave a lo largo de la costa occidental de Alaska. Alrededor de 1990, los observadores notaron una alarmante declinación en el número de nutrias, lo que dio por resultado un incremento en las poblaciones de erizos marinos que eran sus presas. Esto condujo a la sobreex-

plotación por parte de los erizos de los bosques de algas que proveen un hábitat submarino esencial para una gran variedad de especies marinas. ¿Qué acabó con las nutrias? Las orcas, que antes se alimentaban primordialmente de focas y leones marinos, comenzaron a alimentarse cada vez más de nutrias marinas, conforme desaparecían sus presas de costumbre. Los científicos piensan que las poblaciones de focas y de leones marinos declinaron como resultado de la pesca excesiva de los humanos en el Pacífico Norte, reduciendo el abasto de alimento de estos comedores de pescado. En la sabana africana, el elefante africano es un depredador clave. Al alimentarse de árboles pequeños y arbustos, los elefantes impiden que los bosques invadan la sabana y contribuyen a conservar la comunidad de los pastizales (FIGURA 27-14b). En el capítulo 30 aprenderás más acerca de otra especie clave: el lobo.

Es difícil identificar las especies clave, porque para ello habría que retirar selectivamente la especie y estudiar la comunidad durante varios años antes y después de su remoción. Sin embargo, muchos estudios ecológicos, que se han realizado desde que se introdujo el concepto, prueban que las especies clave son importantes en una extensa variedad de comunidades. ¿Por qué es conveniente estudiar las especies clave? A medida que las actividades humanas violan los ecosistemas naturales, resulta cada vez más urgente comprender las interacciones en la comunidad y preservar las especies que son cruciales para el mantenimiento de la comunidad natural.

27.6 SUCESIÓN: ¿CÓMO CAMBIA UNA COMUNIDAD A TRAVÉS DEL TIEMPO?

En un ecosistema terrestre maduro, las poblaciones que constituyen la comunidad interactúan unas con otras y con su entorno inanimado en formas complejas. Pero esta enmarañada red de vida no surgió totalmente formada de la roca desnuda o del suelo llano, sino que emergió en etapas a lo largo de mucho tiempo, por un proceso denominado sucesión. La **sucesión** es un cambio estructural de una comunidad y de su ambiente inanimado al paso del tiempo. Es una especie de "relevo de la comunidad" en el que los conjuntos de plantas y animales toman el lugar unos de otros en una secuencia que es predecible hasta cierto punto.

La sucesión va precedida por una **perturbación**, un evento que desorganiza el ecosistema alterando ya sea su comunidad, su estructura abiótica o ambas. En el caso de la sucesión primaria, la perturbación puede ser un glaciar que erosiona el paisaje para dejar la roca desnuda o un volcán que cubre un ecosistema con nuevas rocas o que da origen a una isla (FIGURA 27-15a). En la sucesión secundaria, la perturbación es mucho más limitada. Por ejemplo, los castores, los deslizamientos de tierra o la acción humana pueden producir diques que obstruyen el paso de corrientes, haciendo que se formen pantanos, estanques o lagos. Un deslizamiento de tierra o avalancha podría arrasar los árboles de la ladera de una montaña. El fuego es otra perturbación común. Las erupciones volcánicas, como en el caso del monte Santa Helena, dejan tras de sí un ambiente rico en nutrimentos que alienta la rápida invasión de nuevas formas de vida (FIGURA 27-15b

).

Los cambios precisos que ocurren durante la sucesión son tan variados como los ambientes en los que se lleva a cabo, pero podemos reconocer ciertas etapas de carácter general. En cada caso, inician la sucesión unas cuantas plantas invasoras resistentes llamadas **pioneras**, las cuales alteran el ecosistema en formas que favorecen a plantas competidoras, que gradualmente las desplazan. Si nada la perturba, la sucesión prosigue hasta formar una **comunidad clímax**. De manera alternativa, las perturbaciones recurrentes mantienen muchas comunidades en etapas de **subclímax**. En nuestro análisis de la sucesión concentraremos nuestra atención en las comunidades vegetales, que dominan el paisaje y proveen tanto alimento como un hábitat para los animales.

Existen dos formas principales de sucesión: primaria y secundaria

La sucesión adopta dos formas principales: primaria y secundaria. Durante la **sucesión primaria** una comunidad coloniza poco a poco la roca desnuda, la arena o un estanque glacial limpio donde no hay rastro de una comunidad anterior. La generación de una comunidad "desde cero" es un proceso que por lo regular toma miles o incluso decenas de miles de años. Durante la **sucesión secundaria** se desarrolla una nueva comunidad después de que un ecosistema existente ha sido alterado de forma que deja rastros de una comunidad anterior, como el suelo y las semillas. Por esta razón, la sucesión secundaria se lleva a cabo mucho más rápidamente que la sucesión primaria: tarda unos cuantos siglos. En los siguientes ejemplos examinaremos estos procesos con mayor detalle.

La sucesión primaria comienza en la roca desnuda

La FIGURA 27-16 ilustra la sucesión primaria en Isle Royale, Michigan, una isla del lago Superior. La roca desnuda, como la que deja expuesta un glaciar que retrocede, libera nutrimentos minerales por *meteorización.* La meteorización permite la formación de fisuras en la roca debido a la contracción y expansión alternadas que provocan los ciclos de congelación y descongelación. La acción química, como la lluvia ácida, destruye aún más la superficie.

La roca erosionada ofrece a los líquenes, una especie pionera, un lugar de fijación donde no hay competidores y sí luz solar en abundancia. Los líquenes llevan a cabo la fotosíntesis y obtienen minerales disolviendo parte de la roca con un ácido que secretan. Conforme los líquenes pioneros se extienden sobre la roca, musgos amantes del sol y resistentes a la sequía comienzan a crecer en las grietas. Fortalecido por los nutrimentos liberados por los líquenes, el musgo forma un tapete denso que atrapa polvo, partículas de roca diminutas y fragmentos de residuos orgánicos. Termina por cubrir y exterminar a los líquenes que permitieron su crecimiento. Conforme algunos musgos mueren cada año, sus cuerpos agregan elementos a una creciente base de nutrimentos, mientras el tapete de musgo vivo actúa como una esponja que atrapa humedad. Dentro del musgo germinan las semillas de plantas más grandes, como la campánula y la milenrama. Más tarde, estas plantas mueren y sus cuerpos se suman a una capa de suelo cada vez más espesa. Después, arbustos leñosos como el arándano y el enebro aprovechan el suelo recién formado, y el musgo y los líquenes que sobreviven quedan cubiertos por su sombra y sepultados bajo una capa de hojas y vegetación en descomposición. Con el tiempo, árboles como el pino, la

a) Monte Kilauea, Hawái

b) Monte Santa Helena, estado de Washington

c) Yellowstone, Wyoming

FIGURA 27-15 La sucesión en curso
Estos pares de fotografías ilustran la sucesión primaria y secundaria. ***a)*** Sucesión primaria. Izquierda: El volcán hawaiano Kilauea ha hecho erupción en repetidas ocasiones desde 1983, lanzando ríos de lava sobre los campos circundantes. Derecha: Un helecho pionero echa raíces en la lava endurecida. ***b)*** Sucesión secundaria. Izquierda: El 18 de mayo de 1980, la explosión del monte Santa Helena en el estado de Washington devastó el ecosistema de bosque de pinos de sus laderas. Derecha: Veinte años después, la vida abunda en el paisaje que en un tiempo fue estéril. Puesto que aún hay restos del antiguo ecosistema, éste es un ejemplo de sucesión secundaria. ***c)*** Sucesión secundaria. Izquierda: En el verano de 1988, grandes incendios arrasaron los bosques del Parque Nacional Yellowstone, en Wyoming. Derecha: Árboles y plantas con flor prosperan bajo la luz del sol, y las poblaciones de vida silvestre se recuperan conforme se produce la sucesión secundaria. PREGUNTA: La gente ha combatido los incendios durante décadas. ¿Cuáles son las implicaciones del combate al fuego para los ecosistemas forestales y la sucesión?

FIGURA 27-16 Sucesión primaria
Aquí se muestra la sucesión primaria que se lleva a cabo sobre la roca desnuda en el norte de Michigan.

picea azul y el álamo temblón arraigan en las grietas más grandes y los arbustos amantes del sol quedan cubiertos por su sombra. Dentro del bosque prosperan las plantas de semilla de árboles más altos o de crecimiento más rápido, como el abeto balsámico, el abedul de Ontario y el abeto blanco. Con el tiempo, estos árboles se elevan por encima de los árboles originales —que son intolerantes a la sombra— y toman su lugar. Al cabo de mil años o más, un bosque clímax alto prospera en lo que alguna vez fue roca desnuda.

Una granja abandonada experimenta sucesión secundaria

La **FIGURA 27-17** ilustra la sucesión secundaria en una granja abandonada del sudeste de Estados Unidos. Las especies pioneras son malezas anuales de rápido crecimiento como el garranchuelo, la ambrosía y la acedera, que arraigan en el rico suelo que ya está presente y prosperan bajo la luz directa del sol. Por lo general, producen grandes cantidades de semillas que se dispersan fácilmente y les ayudan a colonizar espacios abiertos, pero no compiten contra las especies de larga vida (perennes) que crecen poco a poco y brindan sombra a las pioneras. Algunos años más tarde, invaden el terreno plantas perennes como los ásteres, la vara de oro, el pasto retama y arbustos leñosos como la zarzamora. Estas plantas se multiplican rápidamente y predominan durante varias décadas. Con el tiempo, toman su lugar pinos y árboles caducifolios de rápido crecimiento, como el tulipero de Virginia y el liquidámbar, que brotan de semillas arrastradas por el viento. Estos árboles destacan al cabo de unos 25 años, y un bosque de pinos domina el campo durante el resto del primer siglo. Mientras tanto, árboles de madera dura resistentes a la sombra y de crecimiento lento, como el roble y el nogal americano, arraigan debajo de los pinos. Pasado el primer siglo, estos árboles

FIGURA 27-17 Sucesión secundaria
Aquí se muestra la sucesión secundaria que se lleva a cabo en un campo agrícola arado y abandonado del sudeste de Estados Unidos.

comienzan a sobresalir y a dar sombra a los pinos, que terminan por morir por falta de luz solar. Para finales del segundo siglo se tiene un bosque de clímax relativamente estable, dominado por el roble y el nogal americano.

También hay sucesión en los estanques y lagos

En los estanques o lagos de agua dulce, la sucesión ocurre a consecuencia de cambios dentro del cuerpo de agua y también como resultado de la entrada de nutrimentos desde el exterior del ecosistema. Los sedimentos y nutrimentos que introduce el agua que escurre del terreno circundante tienen efectos particularmente notables en los pequeños lagos, estanques y pantanos de agua dulce, que poco a poco experimentan una sucesión hasta transformarse en terrenos secos (**FIGURA 27-18**). En los bosques, los lagos que experimentan sucesión llegan a formar praderas. A medida que el lago se rellena a partir de los bordes, los pastos colonizan el suelo recién expuesto. Conforme el lago se encoge y la pradera se extiende, los árboles invaden el terreno en torno a los bordes de la pradera. Si regresamos a un lago forestal 20 años después de una primera visita, probablemente lo encontraríamos un poco más pequeño.

La sucesión culmina en la comunidad clímax

La sucesión termina con una comunidad clímax relativamente estable, que subsiste por sí misma si no es perturbada por fuerzas externas (como incendios, invasión de una especie introducida o actividades humanas). Las poblaciones de una comunidad clímax tienen nichos ecológicos que les permiten coexistir sin sustituirse unas por otras. En general, las comunidades clímax tienen más especies y más tipos de interacción que las etapas más tempranas de la sucesión. Las especies vegetales que predominan en las comunidades clímax son en general más longevas y tienden a ser más grandes que las especies pioneras; esta tendencia es particularmente evidente en los ecosistemas donde el bosque es la comunidad clímax.

Es probable que al viajar hayamos advertido que el tipo de comunidad clímax varía notablemente de una región a la siguiente. Por ejemplo, al recorrer el estado de Colorado, se observa una comunidad clímax de pradera de pastos cortos en las llanuras orientales (en las escasas zonas donde no ha sido sustituida por fincas agrícolas), bosques de pinos y piceas en las montañas, tundra en las partes más altas y una comunidad clímax dominada por la artemisa en los valles occidentales. La naturaleza exacta de la comunidad clímax está determinada por numerosas variables geológicas y climáticas que incluyen la temperatura, la precipitación pluvial, la altura, la latitud, el tipo de roca (que determina la clase de nutrimentos disponibles) y la exposición al sol y al viento. Los sucesos naturales, como los huracanes, las avalanchas y los incendios iniciados por los relámpagos pueden destruir secciones de un bosque clímax; en tal caso se reinicia la sucesión secundaria y se crea un mosaico de diversas etapas de sucesión dentro de un ecosistema.

En muchos bosques de Estados Unidos los guardabosques están permitiendo que los incendios iniciados por los relámpagos sigan su curso, al reconocer que este proceso natural es importante para el mantenimiento del ecosistema en su totalidad. Los incendios liberan nutrimentos que utilizan las plantas; además, matan algunos de los árboles que envuelven en llamas, aunque habitualmente no todos, con lo cual la luz solar llega al piso del bosque y estimula el crecimiento de *plantas de subclímax*, que pertenecen a una etapa de sucesión más temprana que la etapa de clímax. La combinación de regiones de clímax y subclímax dentro del ecosistema crea nuevos hábitat para un número más grande de especies.

Las actividades humanas pueden alterar notablemente la vegetación de clímax. Grandes extensiones de pastizales de la zona occidental de Estados Unidos, por ejemplo, están dominadas actualmente por la artemisa como resultado del pastoreo excesivo. El pasto que comúnmente gana la partida a la artemisa es consumido selectivamente por el ganado, lo que permite que la artemisa prospere.

Algunos ecosistemas se mantienen en un estado de subclímax

A ciertos ecosistemas no se les permite alcanzar la etapa de clímax, sino que se les mantiene en una etapa de subclímax. La pradera de pastos altos, que alguna vez cubrió el norte de Missouri e Illinois, es un subclímax de un ecosistema cuya comunidad clímax es de bosque caducifolio. La pradera se conservaba mediante incendios periódicos, algunos iniciados por los relámpagos y otros encendidos deliberadamente por los indígenas con el fin de aumentar las tierras de pastoreo para los búfalos. Ahora el bosque invade los pastizales, y se mantienen reservas limitadas de pradera mediante quemas cuidadosamente reguladas.

La agricultura también depende del mantenimiento artificial de comunidades subclímax elegidas cuidadosamente. Las gramíneas forman pastos especializados característicos de las etapas iniciales de la sucesión, y se invierte mucha energía

FIGURA 27-18 Sucesión en un estanque de agua dulce
En los estanques pequeños los materiales que entran provenientes del entorno aceleran la sucesión. ***a)*** En este pequeño estanque los minerales disueltos arrastrados por el agua que escurre de los alrededores sostienen las plantas acuáticas, cuyas semillas o esporas fueron transportadas por los vientos o por aves y otros animales. ***b)*** Al paso del tiempo, los cuerpos en descomposición de las plantas acuáticas forman el suelo que sirve de anclaje a más plantas terrestres. Por último, el estanque se transforma totalmente en terreno seco.

en impedir que los competidores (malezas y arbustos) se apoderen del terreno. El césped suburbano es un ecosistema de subclímax que se conserva con mucho esfuerzo. La poda (una perturbación) destruye los invasores leñosos, y los herbicidas que muchos propietarios aplican, matan selectivamente a plantas pioneras como el garranchuelo y el diente de león.

Estudiar la sucesión es estudiar las variaciones que las comunidades sufren al paso del tiempo. En las comunidades clímax que se forman durante la sucesión influyen fuertemente el clima y la geografía, esto es, la distribución de los ecosistemas en el espacio. Los desiertos, los pastizales y los bosques caducifolios son comunidades clímax que se han formado en amplias regiones geográficas con condiciones ambientales similares. Estas zonas extensas de comunidades vegetales características se llaman **biomas**. Aunque las comunidades comprendidas en los diversos biomas difieren radicalmente en cuanto a los tipos de poblaciones que sostienen, las comunidades de todo el mundo están estructuradas con arreglo a ciertas reglas de carácter general. En los siguientes capítulos se describen estos principios de la estructura de los ecosistemas, así como algunos de los grandes biomas del mundo.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

¿El camuflaje es capaz de dividir una especie?

El insecto conocido como insecto palo tiene un nombre adecuado; su cuerpo largo y camuflado se combina hermosamente con las plantas de las que se alimenta para esconderse de los pájaros y las lagartijas depredadores. En las montañas de Santa Inés en California, una sola especie de insecto palo (*Timena cristinae*) exhibe dos coloraciones distintas y genéticamente determinadas: verde con una raya blanca y verde uniforme. La investigadora Cristina Sandoval encontró que la forma rayada se oculta más a menudo en los arbustos de chamizo, de los que se alimenta y donde casi desaparece entre las hojas con forma de aguja (**FIGURA 27-19**, arriba). En contraste, la investigadora encontró que la forma con color verde uniforme se alimenta casi por completo de lila azul silvestre (**FIGURA 27-19**, abajo), camuflada entre las hojas de color verde intenso de las lilas.

Los pájaros y las lagartijas comen vorazmente insectos palo de uno y otro color. Por consiguiente, las formas rayadas que prefieren hojas rayadas estarán mejor camufladas, lo que les permite sobrevivir para reproducirse y transmitir su preferencia por tales plantas a su descendencia. Los insectos palo de color verde uniforme que prefieren hojas de color verde intenso tendrán una ventaja de supervivencia similar. Sandoval y sus colaboradores de la Universidad Simon Frazer, en Canadá, llevaron ambas formas de insectos al laboratorio y les permitieron aparearse. Observaron que los insectos palo de los chamizos preferían aparearse con ejemplares de su mismo tipo; de igual forma, los insectos palo de las lilas tendían a aparearse con sus semejantes. Esto indica que la selección natural ha favorecido las diferencias de comportamiento (así como las de color) que acompañan a las preferencias de alimento. El apareamiento selectivo garantiza que la descendencia se parecerá a las plantas que han servido de huéspedes a los progenitores. Aunque insectos palo de distinto color aún son capaces de cruzarse, los científicos piensan que están presenciando las etapas iniciales de la división de una especie. Los rasgos heredados que hacen que insectos de colores diferentes se parezcan y prefieran comer una especie particular de planta crean un tipo de *aislamiento ecológico* (descrito en el capítulo 16), en el que es poco probable que individuos de colores distintos se encuentren y se apareen. Esto crea el marco para una divergencia ulterior de rasgos físicos y de comportamiento en tanto que las dos formas encuentran diferentes presiones selectivas con base en su preferencia por distintas plantas.

FIGURA 27-19 Variantes de color de los insectos palo prefieren distintas plantas
(arriba) La forma rayada del insecto palo se oculta bien entre las hojas con forma de aguja de su alimento preferido, los arbustos de chamizo. **(abajo)** La versión de color uniforme de la misma especie combina bien con las hojas de la lila silvestre, que prefiere como alimento. Esta fotografía muestra una pareja. En el laboratorio los insectos prefirieron aparearse con individuos de su mismo color.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

LA INVASIÓN DEL MEJILLÓN CEBRA

Aproximadamente cinco años después del arribo del mejillón cebra, los científicos vieron complacidos que una esponja nativa crecía encima de los mejillones. Tanto las esponjas como los mejillones obtienen su alimento filtrando agua y recogiendo las algas microscópicas, de manera que estas especies compiten entre sí por el alimento. En ciertas zonas de estudio el número de mejillones ha disminuido, en parte por haber sido sofocados por las esponjas y en parte porque han servido de alimento a otra especie exótica: el gobio redondo. En 1990 un biólogo de la Universidad de Michigan descubrió un gobio redondo en el río Saint Clair. El gobio llegó probablemente por la misma vía que el mejillón, procedente de su hogar en el sudeste de Europa. Al reconocer a una de sus presas favoritas, este depredador de 12 centímetros de largo comenzó de inmediato a darse un festín con los mejillones cebra pequeños y a expandir sus dominios hacia zonas que ya habían sido invadidas por los mejillones; actualmente hay gobios en los cinco Grandes Lagos.

¿Es ésta una solución accidental al problema de los mejillones? No, por desgracia. Los gobios ignoran a los mejillones cebra más grandes, los que, por lo tanto, siguen reproduciéndose. Además, los gobios no son exigentes en cuanto a su alimento. Además de los mejillones, devoran los huevecillos y las crías de cualquier otro pez presente en su hábitat, por ejemplo, la lobina de boca pequeña, el lucioperca, la perca y el coto espinoso. Ahora, los investigadores estudian formas de contener la propagación del gobio hacia el río Mississippi. Mientras tanto, los mejillones cebra están invadiendo nuevos canales.

Piensa en esto Aunque el gobio redondo se introdujo accidentalmente, se han importado algunos depredadores exóticos para combatir las plagas invasoras, y algunos funcionarios incluso han propuesto importar depredadores no nativos para controlar especies autóctonas que constituyen una plaga, como los saltamontes. Analiza las implicaciones de importar tales "controles biológicos" para las comunidades ecológicas y para las especies nativas. Describe los tipos de estudios que deberían realizarse antes de importar cualquier nuevo depredador.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

27.1 ¿Por qué son importantes las interacciones de la comunidad?

Las interacciones de la comunidad influyen en el tamaño de las poblaciones, en tanto que las poblaciones que interactúan dentro de las comunidades actúan como agentes de selección natural. Por consiguiente, las interacciones de la comunidad también moldean el cuerpo y los comportamientos de las poblaciones que interactúan.

27.2 ¿Cuál es la relación entre el nicho ecológico y la competencia?

El nicho ecológico define todos los aspectos del hábitat y de las interacciones de una especie con sus ambientes animado e inanimado. Cada especie ocupa un nicho ecológico único. La competencia interespecífica se presenta cuando se traslapan los nichos de dos poblaciones dentro de una comunidad. Cuando se obliga a dos especies con el mismo nicho a ocupar el mismo nicho ecológico en condiciones de laboratorio, una de las especies vence siempre a la otra en la competencia. Las especies de las comunidades naturales han evolucionado en formas que evitan la superposición excesiva de sus nichos, con adaptaciones de comportamiento y físicas que permiten la partición de recursos. La competencia interespecífica limita el tamaño y la distribución de las poblaciones en competencia. La competencia intraespecífica es la más intensa porque individuos de la misma especie ocupan el mismo nicho ecológico. La competencia de ambos tipos ejerce controles dependientes de la densidad sobre el crecimiento de la población.

Web tutorial 27.1 Exclusión competitiva y partición de recursos

27.3 ¿Cuáles son los resultados de las interacciones entre los depredadores y sus presas?

Los depredadores se alimentan de otros organismos y, en general, son más grandes y menos abundantes que sus presas. Los depredadores y las presas actúan como poderosos agentes de selección natural unos sobre los otros. Los animales presa han desarrollado diversas coloraciones protectoras que les permiten pasar desapercibidos (camuflaje) o alarmar (coloración de sobresalto) a sus depredadores. Algunas presas son venenosas y presentan una coloración de advertencia que les permite ser reconocidos de inmediato y evitados por los depredadores. La situación en la que un animal ha evolucionado hasta parecerse a otro se llama mimetismo. Tanto los depredadores como las presas utilizan diversas sustancias tóxicas para el ataque y la defensa. Las plantas que son presa de los depredadores han perfeccionado complejas defensas que incluyen desde venenos hasta espinas y una dureza general. Estas defensas, a la vez, han provocado la selección de depredadores capaces de eliminar la toxicidad de los venenos, pasar por alto las espinas y triturar los tejidos duros.

27.4 ¿Qué es la simbiosis?

Las relaciones simbióticas se dan entre dos especies que interactúan estrechamente durante un lapso prolongado e incluyen el parasitismo, el comensalismo y el mutualismo. En el parasitismo, un organismo llamado parásito se alimenta a costa de un huésped más grande y menos abundante, al que normalmente causa daño, pero no mata de inmediato. En el comensalismo una especie obtiene ventajas, que por lo regular consisten en encontrar alimento con más facilidad en presencia de la otra especie, a la cual no le afecta la asociación. El mutualismo es provechoso para ambas especies simbióticas.

27.5 ¿Cómo influyen las especies clave en la estructura de la comunidad?

Las especies clave ejercen más influencia en la estructura de la comunidad que la predecible en función de su número. Por ejemplo, si el elefante africano llegara a estar en peligro de extinción, los pastizales de África en los que habita actualmente podrían convertirse en bosques.

Web tutorial 27.2 La importancia de las especies clave

27.6 Sucesión: ¿Cómo cambia una comunidad a través del tiempo?

La sucesión es un cambio paulatino, al paso del tiempo, de los tipos de poblaciones que constituyen una comunidad. La sucesión primaria, que tarda miles de años, se lleva a cabo donde no existen

restos de una comunidad anterior (como en la roca que ha dejado desnuda un glaciar o la que se ha formado al enfriarse la lava fundida, en una duna de arena o en un lago glacial recién formado). La sucesión secundaria se produce con mayor rapidez, porque aprovecha los restos de una comunidad destruida, como un campo abandonado o un terreno donde ha ocurrido un incendio. La sucesión secundaria en tierra se inicia con plantas pioneras de fácil dispersión y rápido crecimiento, que con el tiempo son sustituidas por especies más longevas, generalmente más grandes y más tolerantes a la sombra. La sucesión continua culmina en una comunidad clímax, que tiende a persistir por sí sola a menos que actúen sobre ella fuerzas externas, como un incendio o las actividades humanas. Ciertos ecosistemas, como la pradera de pastos altos y los campos agrícolas, se mantienen en etapas relativamente tempranas de la sucesión por medio de perturbaciones periódicas.

Web tutorial 27-3 Sucesión primaria

TÉRMINOS CLAVE

bioma *pág. 554*
camuflaje *pág. 543*
coevolución *pág. 538*
coloración de advertencia *pág. 544*
coloración de sobresalto *pág. 544*
comensalismo *pág. 547*
competencia *pág. 538*
competencia interespecífica *pág. 538*
competencia intraespecífica *pág. 540*
comunidad *pág. 538*
comunidad clímax *pág. 550*
especie clave *pág. 549*
especie invasora *pág. 541*
herbívoro *pág. 540*
mimetismo *pág. 544*
mimetismo agresivo *pág. 546*
mutualismo *pág. 547*
nicho ecológico *pág. 538*
parásito *pág. 547*
partición de recursos *pág. 539*
perturbación *pág. 550*
pionero *pág. 550*
principio de exclusión competitiva *pág. 539*
simbiosis *pág. 547*
subclímax *pág. 550*
sucesión *pág. 550*
sucesión primaria *pág. 550*
sucesión secundaria *pág. 550*
zona intermareal o intermareas *pág. 540*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Define el concepto de *comunidad* ecológica y menciona tres tipos importantes de interacciones en la comunidad.

Describe cuatro medios muy diferentes que permiten a plantas y animales específicos evitar servir de alimento. En cada caso describe una adaptación que podría surgir en los depredadores de estas especies para vencer sus defensas.

Menciona dos tipos importantes de simbiosis; defínelos y cita un ejemplo de cada uno.

4. ¿Qué tipo de sucesión tendría lugar en un terreno desmontado (una región donde se han eliminado todos los árboles talándolos) de un bosque nacional y por qué?
5. Cita dos comunidades subclímax y dos comunidades clímax. ¿En qué aspectos difieren?
6. Define la *sucesión* y explica por qué ocurre.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Algunos ecologistas consideran a los animales herbívoros que comen semillas como depredadores de plantas y a los animales herbívoros que comen hojas, como parásitos de plantas. Comenta acerca de la validez de este esquema de clasificación.
2. Un ecologista de visita en una isla encuentra dos especies de aves estrechamente emparentadas, una de las cuales tiene el pico un poco más grande que la otra. Interpreta este descubrimiento con respecto al principio de exclusión competitiva y al nicho ecológico y explica ambos conceptos.
3. Reflexiona sobre el caso del pez rana camuflado y su presa. Mientras el pez rana reposa camuflado en el lecho del océano, agitando su señuelo, un pequeño pez se aproxima a éste y es devorado, en tanto que un pez depredador muy grande no advierte la presencia del pez rana. Describe todos los tipos posibles de interacciones en la comunidad y adaptaciones que presentan estos organismos. Recuerda que los depredadores también pueden ser presas, ¡y que las interacciones dentro de la comunidad son complejas!
4. Idea un experimento para averiguar si el canguro es una especie clave en las regiones áridas de Australia.
5. ¿Por qué es difícil estudiar la sucesión? Sugiere algunas formas de enfocar este desafío en el caso de algunos ecosistemas.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Amos, W. H. "Hawaii's Volcanic Cradle of Life". *National Geographic*, julio de 1990. Un naturalista explora la sucesión relacionada con los flujos de lava.

Enserink, M. "Biological Invaders Sweep In"; Kaiser, J. "Stemming the Tide of Invading Species"; y Malkoff, D. "Fighting Fire with Fire", *Science*, 17 de septiembre de 1999. Una serie de artículos sobre los problemas que plantean las especies invasoras.

Freindel, S. "If All the Trees Fall in the Forest…" *Discover*, diciembre de 2002. Un hongo importado responsable del añublo del castaño exterminó 3,500 millones de castaños en la década de 1920. Ahora una nueva especie invasora de hongo amenaza una variedad de árboles nativos, incluyendo robles y secuoyas.

Gutin, J. C. "Purple Passion". *Discover*, agosto de 1999. La planta invasora llamada salicaria puede crecer hasta alcanzar una altura de 3 metros. Introducida a la costa oriental de Estados Unidos hace 200 años, en la actualidad se está esparciendo rápidamente hacia el oeste, amenazando a especies nativas.

Harder, B. "Stemming the Tide". *Science News*, 13 de abril de 2002. ¿Cómo se puede evitar que el lastre de los barcos propague especies invasoras como el mejillón cebra?

Power, M. *et al*. "Challenges in the Quest for Keystones". *Bioscience*, septiembre de 1996. Una revisión exhaustiva de la importancia de las especies clave y los desafíos que implica su estudio.

Stewart, D. "Good Bugs Gone Bad". *National Wildlife*, agosto/septiembre de 2005. Un biocontrol causa estragos: la catarina asiática se come y desplaza a las catarinas nativas.

Withgott, J. "California Tries to Rub Out the Monster of the Lagoon". *Science*, 22 de marzo de 2002. Una alga tropical invasora ahora cubre áreas costeras del Mediterráneo y Australia, mientras que California intenta desesperadamente evitar que invada la costa occidental de Estados Unidos.

CAPÍTULO

28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas?

Un oso pardo americano intercepta a un salmón en su travesía para la zona de desove que recorre en contra de la corriente de una cascada en su intento por llegar al mismo lugar donde nació hace algunos años.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: El regreso del salmón

28.1 ¿Cuáles son las trayectorias de la energía y de los nutrimentos?

28.2 ¿Cómo fluye la energía a través de las comunidades?

La energía entra en las comunidades por la vía de la fotosíntesis

La energía pasa de un nivel trófico a otro

La transferencia de energía de un nivel trófico a otro es ineficiente

Guardián de la Tierra: Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias

28.3 ¿Cómo se desplazan los nutrimentos dentro de los ecosistemas y entre ellos?

El ciclo del carbono pasa por la atmósfera, los océanos y las comunidades

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera

El ciclo del fósforo carece de componentes atmosféricos

La mayor parte del agua no sufre cambios químicos durante su ciclo

28.4 ¿A qué se debe la "lluvia ácida"?

La sobrecarga de los ciclos del nitrógeno y del azufre es la causa de la lluvia ácida

La sedimentación ácida daña la vida en lagos y bosques

La Ley del Aire Limpio ha reducido significativamente las emisiones de azufre, pero no las de nitrógeno

28.5 ¿Qué provoca el calentamiento global?

La interferencia en el ciclo del carbono contribuye al calentamiento global

Los gases de invernadero retienen el calor en la atmósfera

El calentamiento global tendrá graves consecuencias

¿Cómo está respondiendo la humanidad a esta amenaza?

Guardián de la Tierra: Los polos en peligro

Enlaces con la vida: Es posible hacer una diferencia

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón

ESTUDIO DE CASO EL REGRESO DEL SALMÓN

EL SALMÓN ROJO del noroeste del Pacífico tiene un notable ciclo de vida. Los huevos eclosionan en depresiones poco profundas en el lecho de grava de una rápida corriente de agua, y los pequeños salmones siguen la trayectoria de la corriente hacia ríos de mayores dimensiones que finalmente desembocan en el océano. Al llegar a los estuarios —las zonas pantanosas donde se mezcla el agua dulce con el agua de mar—, la singular fisiología de los salmones les permite adaptarse al cambio al agua salada antes de que lleguen al mar. El bajo porcentaje de jóvenes salmones que logran evadir a los depredadores crecen hasta llegar a la adultez, alimentándose de crustáceos y de peces más pequeños. Años más tarde, sus cuerpos experimentan otra transformación. Al alcanzar la maduración sexual, un fuerte instinto —del que aún se sabe poco a pesar de varias décadas de investigación— los atrae de regreso hacia el agua dulce, pero sin dejarse llevar por una corriente o un río. Los salmones nadan a lo largo de la costa (probablemente navegando de acuerdo con el campo magnético de la Tierra) hasta que el olor único de la corriente que les sirvió de hogar los incita a nadar hacia las aguas que se encuentran tierra adentro. Luchando contra rápidas corrientes, saltando hacia arriba por pequeñas caídas de agua, ondulándose a través de bancos de arena poco profundos y evadiendo a los pescadores, llevan su preciosa carga de espermatozoides y óvulos de regreso a su hogar para reiniciar el ciclo de vida. El viaje de los peces de regreso a su lugar de nacimiento también es extraordinario en otra forma. Los nutrimentos casi siempre fluyen corriente abajo, de la tierra hacia el océano; los salmones, provistos con músculos y grasa que adquirieron alimentándose en el océano, no sólo luchan contra el flujo del río en su travesía corriente arriba; también reinvierten el desplazamiento habitual de los nutrimentos. ¿Qué les espera a los salmones al final de su travesía? ¿Cómo afecta su viaje a la red de vida corriente arriba?

28.1 ¿CUÁLES SON LAS TRAYECTORIAS DE LA ENERGÍA Y DE LOS NUTRIMENTOS?

Las actividades de la vida, desde la migración de los salmones hasta el transporte activo de moléculas a través de una membrana celular, se llevan a cabo gracias a la *energía* de la luz solar. Las moléculas de la vida se construyen a partir de componentes químicos básicos que se obtienen del medio en forma de *nutrimentos*. La energía solar que continuamente bombardea la Tierra se utiliza y se transforma mediante las reacciones químicas que alimentan la vida y termina convertida en energía calorífica que se irradia de regreso hacia el espacio. En cambio, los nutrimentos químicos permanecen en la Tierra. Aunque pueden cambiar en cuanto a su forma y su distribución, e incluso ser transportados entre diferentes ecosistemas, los nutrimentos se reciclan constantemente. Así, son dos las leyes básicas que rigen la función de los ecosistemas. La primera establece que la energía se desplaza de una comunidad a otra dentro de los ecosistemas en un flujo unidireccional continuo, por lo que es necesario reponer la energía constantemente a partir de una fuente externa: el Sol. La segunda ley señala que los nutrimentos pasan en forma continua por ciclos y se aprovechan de manera repetida dentro de los ecosistemas y entre ellos (FIGURA 28-1). Estas leyes dan forma a las complejas interacciones entre las poblaciones de los ecosistemas y entre las comunidades y su ambiente abiótico.

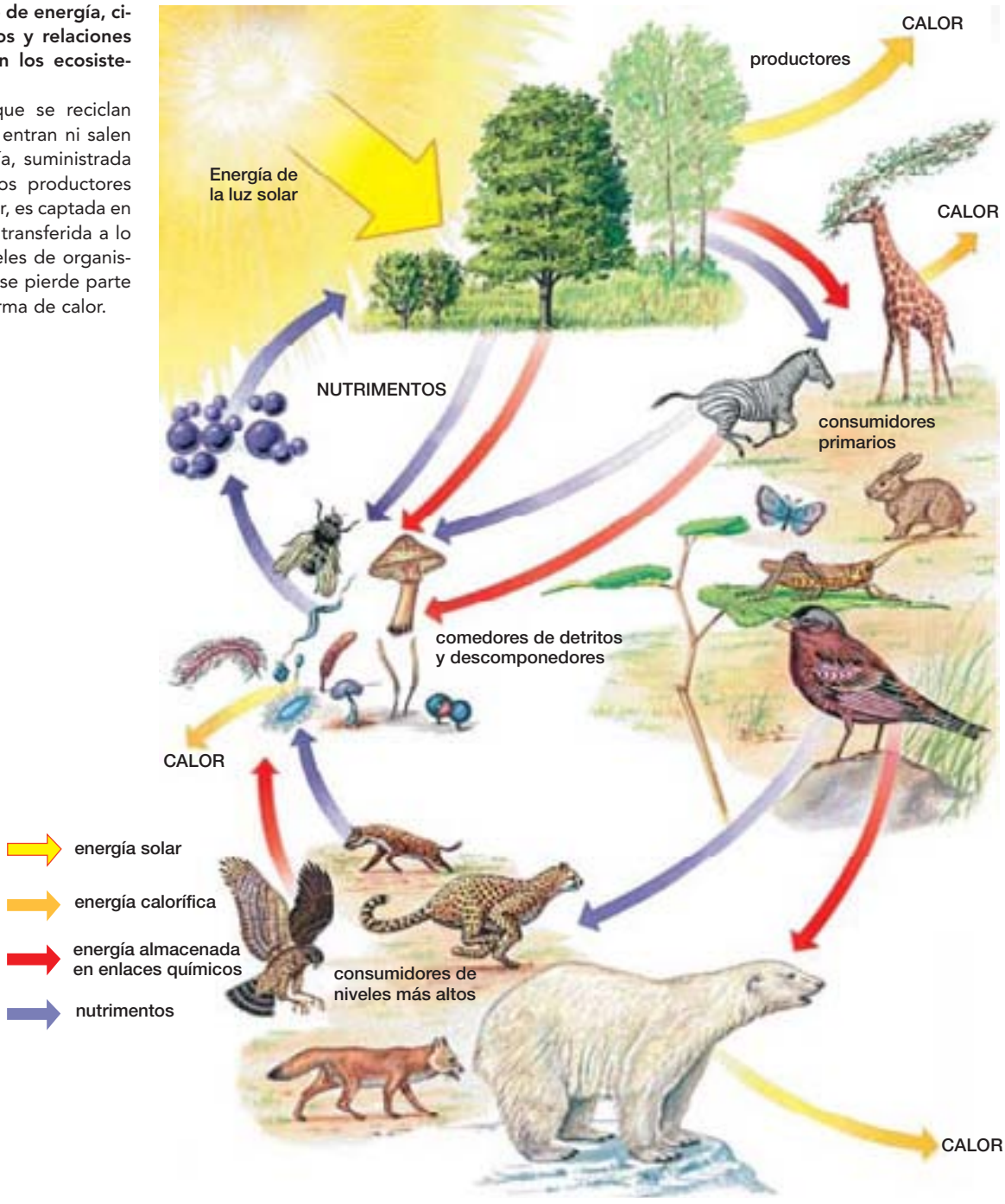


FIGURA 28-1 Flujo de energía, ciclos de nutrimentos y relaciones de alimentación en los ecosistemas
Los nutrimentos, que se reciclan continuamente, no entran ni salen del ciclo. La energía, suministrada continuamente a los productores en forma de luz solar, es captada en enlaces químicos y transferida a lo largo de varios niveles de organismos. En cada nivel se pierde parte de la energía en forma de calor.

28.2 ¿CÓMO FLUYE LA ENERGÍA A TRAVÉS DE LAS COMUNIDADES?

La energía entra en las comunidades por la vía de la fotosíntesis

A 150 millones de kilómetros de distancia, el Sol fusiona átomos de hidrógeno para formar átomos de helio y libera cantidades enormes de energía. Una pequeñísima fracción de esta energía llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas, que incluyen calor, luz y radiación ultravioleta. De la energía que llega, gran parte es reflejada por la atmósfera, las nubes y la superficie terrestre. La Tierra y su atmósfera absorben una cantidad aún mayor, lo que deja sólo alrededor del 1 por ciento para alimentar toda la vida. Del 1 por ciento de la energía solar que llega a la superficie terrestre en forma de luz, las plantas verdes y otros organismos fotosintéticos capturan el 3 por ciento o menos. Así pues, la vida que prolifera sobre este planeta se sostiene con menos del 0.03 por ciento de la energía que la Tierra recibe del Sol.

Durante la fotosíntesis (véase el capítulo 7) los pigmentos como la clorofila absorben longitudes de onda específicas de la luz solar. Esta energía solar se utiliza luego en reacciones que almacenan energía en enlaces químicos y producen azúcar y otras moléculas de alta energía (FIGURA 28-2). Los organismos fotosintéticos, desde los imponentes robles hasta las diatomeas unicelulares del océano, reciben el calificativo de **autótrofos** ("que se alimentan a sí mismos", en griego) o **productores**, porque producen alimento para sí mismos utilizando nutrimentos y luz solar. Al hacerlo, estos organismos, en forma directa o indirecta, también producen alimento para casi todas las demás formas de vida. Los organismos que no llevan a cabo la fotosíntesis, denominados **heterótrofos** ("que se alimentan de otros", en griego) o **consumidores**, deben obtener la energía y muchos de sus nutrimentos previamente empaquetados en las moléculas que componen el cuerpo de otros organismos.

La cantidad de vida que un ecosistema determinado puede sostener está determinada por la energía que captan los productores de ese ecosistema. La energía que los organismos fotosintéticos almacenan y ponen a disposición de otros miembros de la comunidad a lo largo de un periodo específico se denomina **productividad primaria neta**. La productividad primaria neta se mide en unidades de energía (calorías) almacenada por los autótrofos en una unidad de área específica (como metros cuadrados, acres o hectáreas) durante un lapso determinado (a menudo un año). La productividad primaria también se mide en términos de la **biomasa**, o peso seco de material orgánico almacenado por los productores que se agrega al ecosistema por unidad de área en un tiempo específico. En la productividad del ecosistema influyen muchas variables ambientales, entre ellas la cantidad de nutrimentos de la que disponen los productores, la cantidad de luz solar que reciben, la disponibilidad de agua y la temperatura. En el desierto, por ejemplo, la falta de agua limita la productividad; en alta mar, la luz es limitada en aguas profundas y los nutrimentos son escasos en las aguas superficiales. Donde los recursos son abundantes, como en los estuarios y las selvas tropicales, la productividad es alta. En la FIGURA 28-3 se muestran algunas productividades medias de diversos ecosistemas.

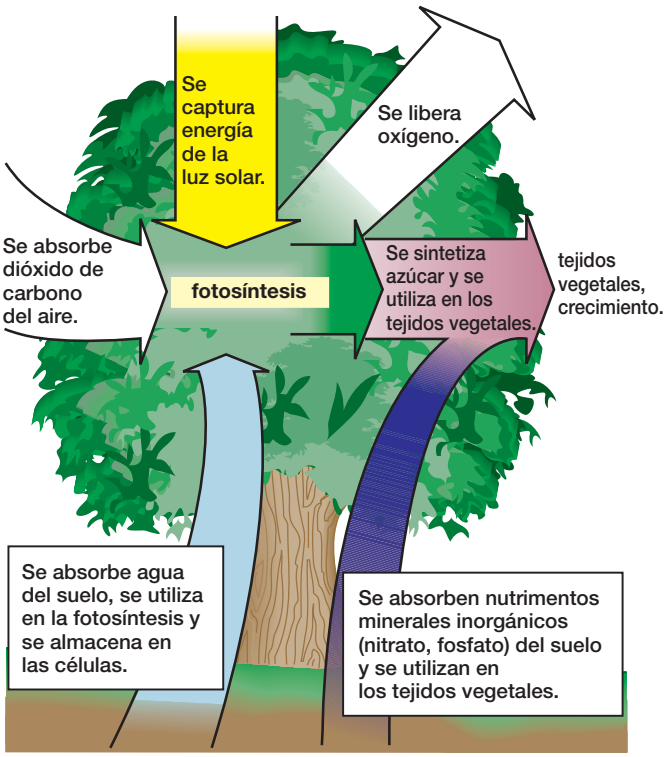

Se captura energía de la luz solar.
Se libera oxígeno.
Se absorbe dióxido de carbono del aire.
fotosíntesis
Se sintetiza azúcar y se utiliza en los tejidos vegetales.
tejidos vegetales, crecimiento.
Se absorbe agua del suelo, se utiliza en la fotosíntesis y se almacena en las células.
Se absorben nutrimentos minerales inorgánicos (nitrato, fosfato) del suelo y se utilizan en los tejidos vegetales.

FIGURA 28-2 Productividad primaria
Los organismos fotosintéticos, que captan energía solar y adquieren nutrimentos inorgánicos a partir del ambiente, suministran toda la energía y la mayor parte de los nutrimentos a los organismos de niveles tróficos superiores.

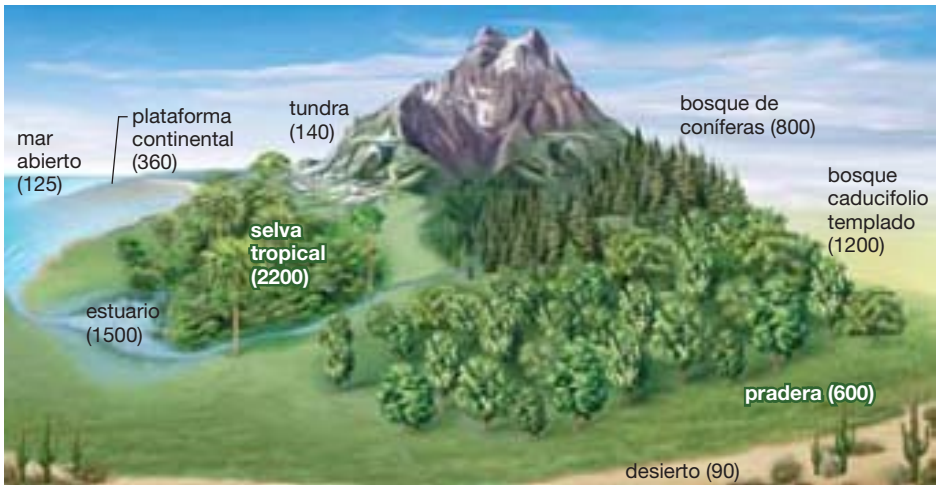


FIGURA 28-3 Comparación de la productividad de los ecosistemas
Productividad primaria neta media, en gramos de material orgánico, por metro cuadrado y por año, de algunos ecosistemas terrestres y acuáticos. Advierte las enormes diferencias de productividad entre los ecosistemas. PREGUNTA: ¿Qué factores contribuyen a estas diferencias en la productividad?

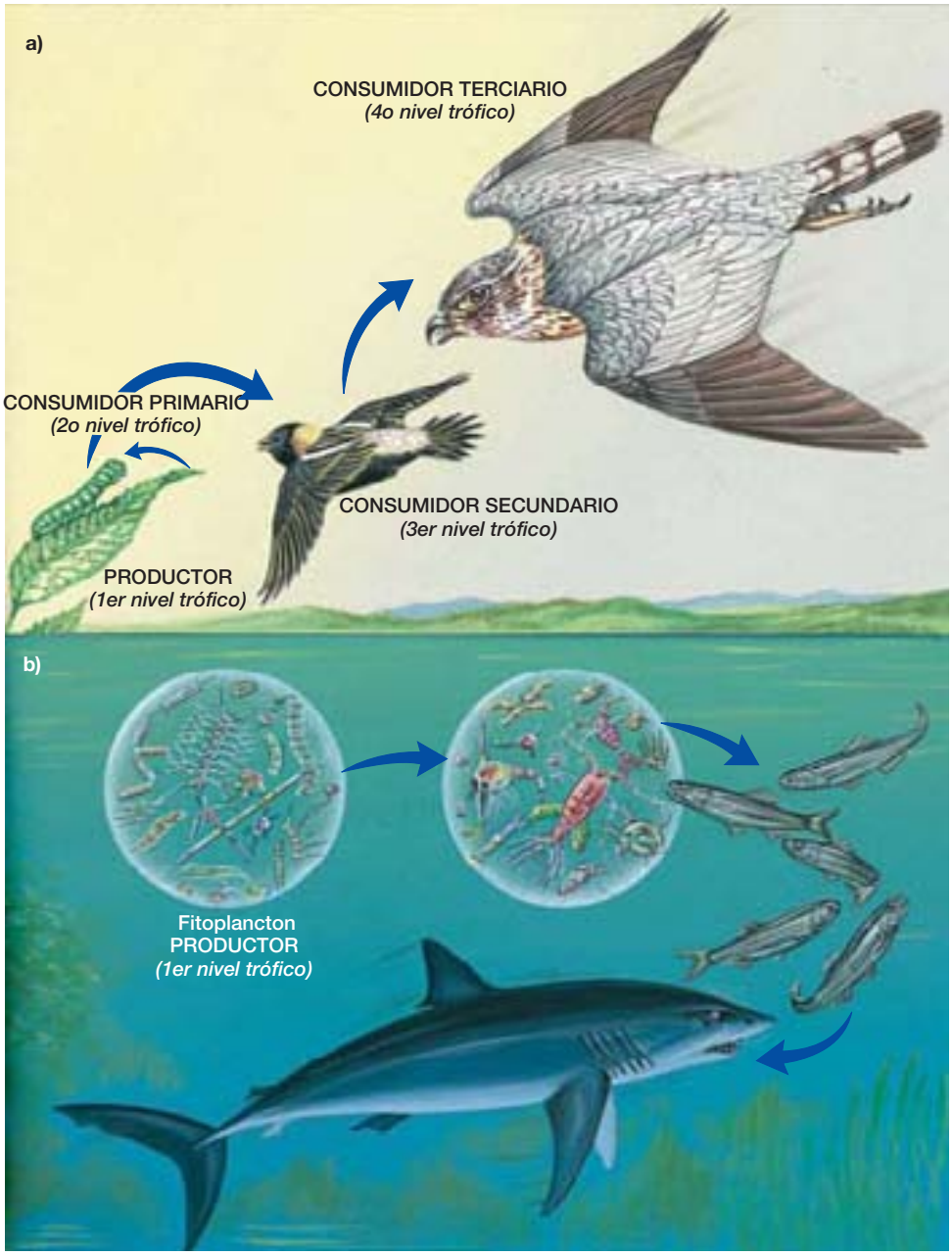


FIGURA 28-4 Cadenas alimentarias
Cadena alimentaria terrestre simple. ***b)*** Cadena alimentaria marina simple.

La energía pasa de un nivel trófico a otro

La energía fluye a través de las comunidades a partir de los productores fotosintéticos y a lo largo de varios niveles de consumidores. Cada categoría de organismo constituye un **nivel trófico** (literalmente, "nivel de alimentación"). Los productores, desde las secuoyas hasta las cianobacterias, forman el primer nivel trófico, pues obtienen su energía directamente de la luz solar (véase la figura 28-1). Los consumidores ocupan varios niveles tróficos. Algunos de ellos se alimentan directa y exclusivamente de los productores, que son la fuente de energía viviente más abundante en cualquier ecosistema. Estos **herbívoros** ("comedores de plantas"), desde los saltamontes hasta las jirafas, también son conocidos como **consumidores primarios** y constituyen el segundo nivel trófico. Los **carnívoros** ("comedores de carne") como la araña, el águila y el lobo, son depredadores que se alimentan principalmente de consumidores primarios. Los carnívoros, llamados también **consumidores secundarios**, constituyen el tercer nivel trófico. Algunos carnívoros se alimentan en ocasiones de otros carnívoros; en esas circunstancias ocupan el cuarto nivel trófico, el de los **consumidores terciarios**.

Las cadenas y redes alimentarias describen las relaciones de alimentación dentro de las comunidades

Con el fin de ilustrar quién se alimenta de quién en una comunidad, es común identificar un representante de cada nivel trófico que se alimenta de un representante del nivel inmediatamente inferior. Esta relación lineal de alimentación se conoce como **cadena alimentaria**. Como se ilustra en la **FIGURA 28-4**, los distintos ecosistemas tienen cadenas alimentarias radicalmente diferentes.

Sin embargo, las comunidades naturales rara vez contienen grupos bien definidos de consumidores primarios, secundarios y terciarios. Una **red alimentaria** muestra las múltiples cadenas alimentarias interconectadas de una comunidad y describe con precisión las relaciones de alimentación efecti-

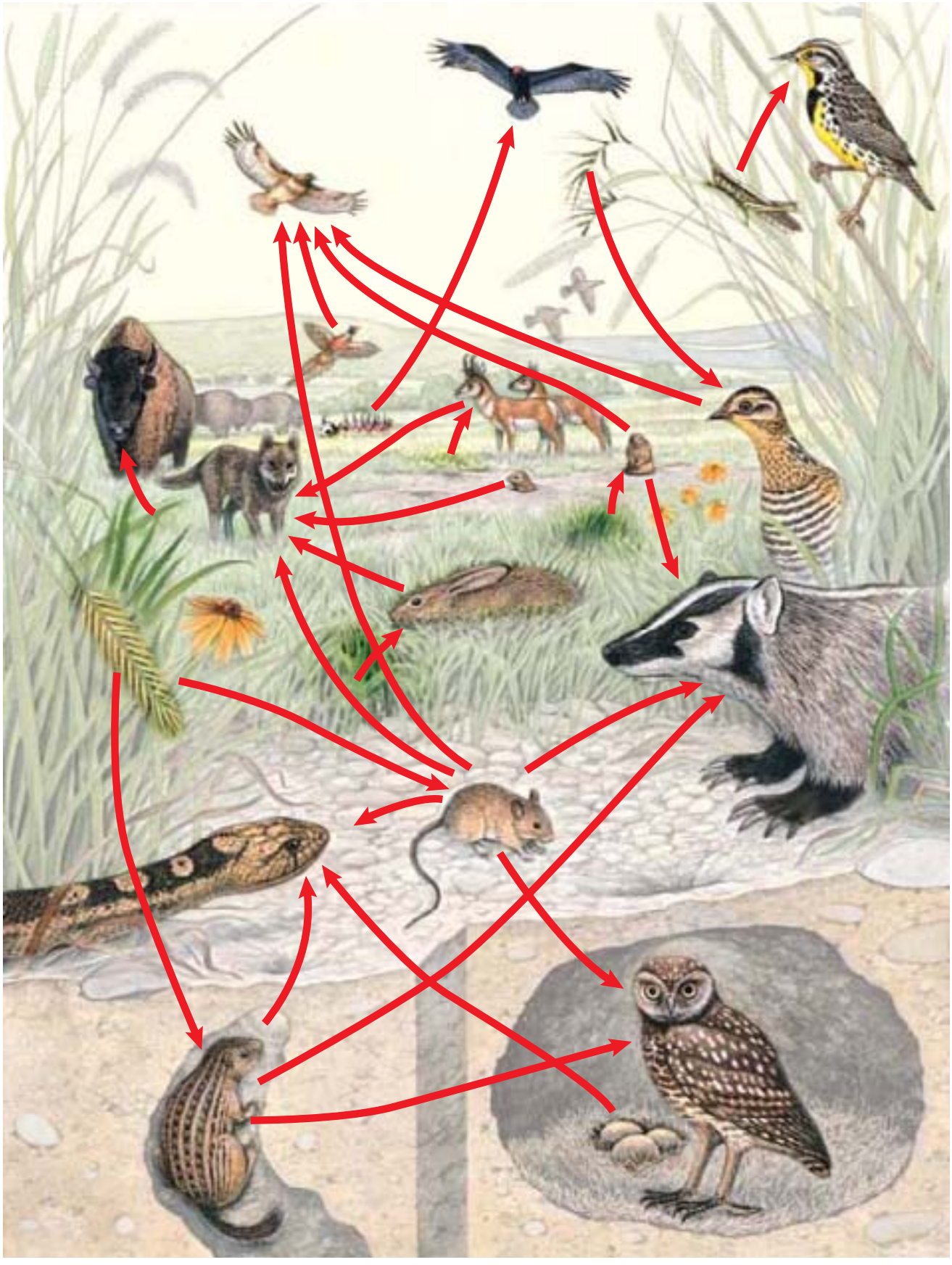


FIGURA 28-5 Una red alimentaria simple en una pradera de pastos cortos

vas dentro de una comunidad específica (**FIGURA 28-5**). Algunos animales, como los mapaches, los osos, las ratas y los seres humanos, por ejemplo, son **omnívoros** ("que comen de todo", en latín), es decir, en momentos diferentes actúan como consumidores primarios, secundarios y, ocasionalmente, terciarios (de tercer nivel). Muchos carnívoros se alimentan ya sea de herbívoros o de otros carnívoros, actuando como consumidores secundarios y terciarios, respectivamente. Por ejemplo, una lechuza es un consumidor secundario cuando devora un ratón, que se alimenta de plantas, pero es un consumidor terciario cuando se come una musaraña, que se alimenta de insectos. Una musaraña que se come un insecto carnívoro es un consumidor terciario, y la lechuza que se alimentó de la musaraña es un consumidor cuaternario (de cuarto nivel). Al digerir una araña, una planta carnívora como la drosera "enmaraña la red" irremediablemente al servir al mismo tiempo como productor fotosintético y como consumidor secundario.

Los comedores de detritos y los descomponedores liberan nutrimentos que se reutilizan

Entre los hilos más importantes de la red alimentaria están los *comedores de detritos* y los descomponedores. *Los* **comedores de detritos** son un ejército de pequeños animales que suelen pasar desapercibidos y que viven de los desperdicios de la vida: exoesqueletos mudados, hojas caídas, desechos y cadáveres (*detrito* significa "residuo de la degradación de un cuerpo"). La red de comedores de detritos es sumamente compleja e incluye lombrices de tierra, ácaros, protistas, ciempiés, ciertos insectos, un singular crustáceo terrestre llamado cochinilla (o "armadillo"), gusanos nematodos e incluso algunos vertebrados grandes como los buitres. Consumen materia orgánica muerta, extraen parte de la energía almacenada en ella y la excretan en un estado de descomposición más avanzada. Sus productos de excreción sirven de alimento a otros comedores de detritos y a los **descomponedores**, que son principalmente hongos y bacterias que digieren el alimento que encuentran afuera de su cuerpo mediante la secreción de enzimas digestivas hacia el ambiente. La capa negra o pelusa gris que a veces observamos en los tomates y en las cortezas de pan que se dejan demasiado tiempo en el refrigerador está formada de hongos de descomposición dedicados a su labor. Absorben los nutrimentos y los compuestos ricos en energía que necesitan, liberando aquellos que quedan.

Las actividades de los comedores de detritos y de los descomponedores reducen el cuerpo y los residuos de los organismos vivos a moléculas simples, como dióxido de carbono, agua, minerales y moléculas orgánicas, que regresan a la atmósfera, el suelo y el agua. Al liberar nutrimentos para su aprovechamiento, los comedores de detritos y los descomponedores constituyen un eslabón vital en los ciclos de nutrimentos de los ecosistemas. En ciertos ecosistemas, como en los bosques caducifolios, por ejemplo, pasa más energía a través de los comedores de detritos y los descomponedores que de los consumidores primarios, secundarios o terciarios.

¿Qué ocurriría si desaparecieran los comedores de detritos y los descomponedores? Esta parte de la red alimentaria, aunque poco notoria, es absolutamente indispensable para la vida en la Tierra. Sin ella, poco a poco las comunidades quedarían sofocadas por la acumulación de residuos y cadáveres. Los nutrimentos almacenados en estos cuerpos no estarían disponibles para enriquecer el suelo, cuya calidad se empobrecería cada vez más hasta que dejara de ser capaz de sostener la vida vegetal. Ya sin las plantas, dejaría de entrar energía en la comunidad; los niveles tróficos superiores, incluidos los seres humanos, también desaparecerían.

La transferencia de energía de un nivel trófico a otro es ineficiente

Como se explicó en el capítulo 6, una ley fundamental de la termodinámica es que la utilización de la energía nunca es totalmente eficiente. Por ejemplo, cuando nuestro automóvil quema gasolina, alrededor del 75 por ciento de la energía liberada se pierde inmediatamente en forma de calor. Esto también ocurre en los sistemas vivos. Por ejemplo, la ruptura de enlaces de trifosfato de adenosina (ATP) para producir una contracción muscular genera calor como producto colateral; por eso, caminar con rapidez en un día frío nos ayuda a entrar en calor. Todas las reacciones bioquímicas que mantienen las células con vida producen pequeñas cantidades de calor residual. Pilas de composta pueden alcanzar temperaturas internas superiores a 54.4°C (130°F), como resultado del calor liberado por los microorganismos descomponedores.

También la transferencia de energía de un nivel trófico al siguiente es muy ineficiente. Cuando una oruga (consumidor primario) devora las hojas de una planta de tomate (productor), sólo una parte de la energía solar captada originalmente por la planta está disponible para el insecto. La planta utilizó una fracción de la energía para crecer y mantenerse viva, en tanto que una proporción mayor se perdió en forma de calor durante estos procesos. Parte de la energía se convirtió en los enlaces químicos de moléculas como la celulosa, que la oruga no puede digerir. Por lo tanto, sólo una fracción de la energía captada por el primer nivel trófico está disponible para los organismos del segundo nivel. La energía que consume la oruga se utiliza parcialmente para impulsar su desplazamiento y producir el rechinido de su boca. Otra parte de esa energía se utiliza en parte para formar el exoesqueleto, que es indigerible, y una importante fracción se desprende en forma de calor. Toda esta energía no está disponible para el ave canora del tercer nivel trófico que se come la oruga. El ave pierde energía en forma de calor corporal, consume aún más durante el vuelo y convierte una cantidad considerable de ella en plumas, pico y huesos, que son indigeribles. Toda esta energía no está disponible para el halcón que la atrapa. En la **FIGURA 28-6** se ilustra un modelo simplificado del flujo de energía por los niveles tróficos de un ecosistema de bosque caducifolio.

Las pirámides de energía ilustran la transferencia de energía entre niveles tróficos

El estudio de diversas comunidades indica que la transferencia neta de energía entre los niveles tróficos tiene una eficiencia aproximada del 10 por ciento, aunque la transferencia entre niveles dentro de las diferentes comunidades varía en grado apreciable. Esto significa que, en general, la energía almacenada en los consumidores primarios (herbívoros) representa sólo el 10 por ciento de la energía almacenada en el cuerpo de los productores. A la vez, el cuerpo de los consumidores secundarios posee aproximadamente el 10 por ciento de la energía almacenada en los consumidores primarios. En otras palabras, de cada 100 calorías de energía solar captada por el pasto, sólo alrededor de 10 calorías se convierten en

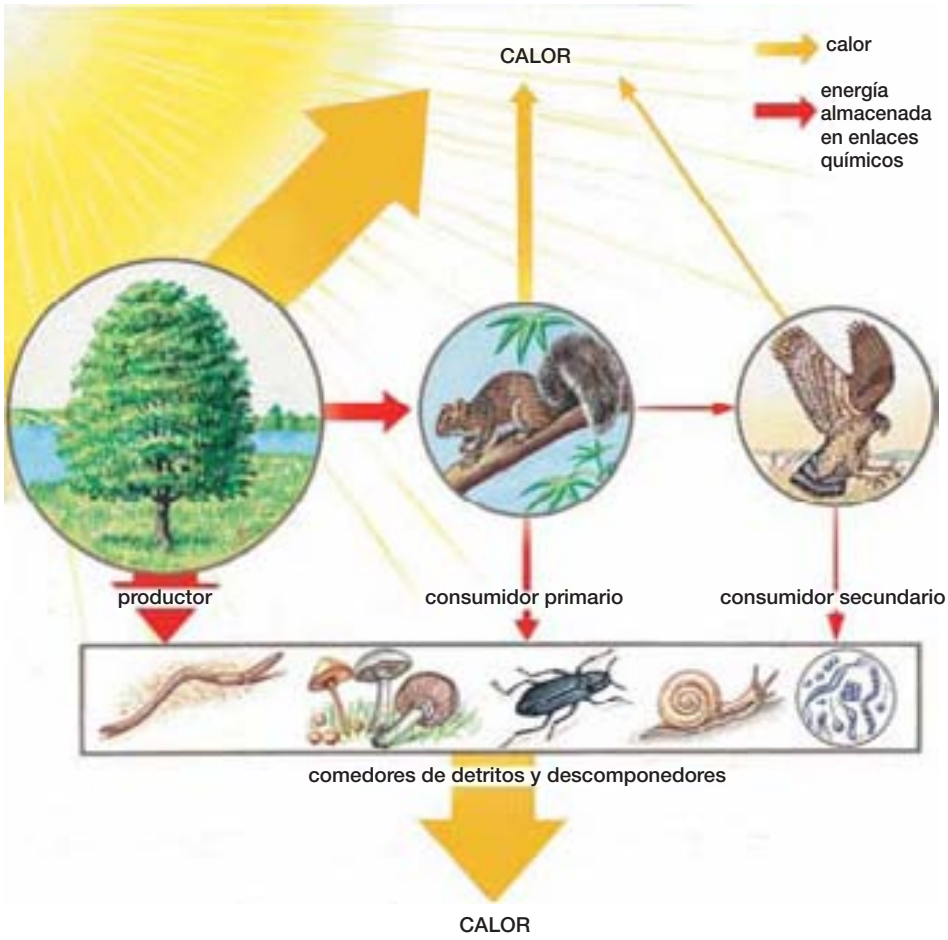


FIGURA 28-6 Transferencia y pérdida de energía
El grosor de las flechas es aproximadamente proporcional a la cantidad de energía que se transfiere entre niveles tróficos como energía química o que se pierde como calor en una comunidad forestal. PREGUNTA: ¿Por qué se pierde tanta energía como calor? Explica este efecto en términos de la segunda ley de la termodinámica (que se estudió en el capítulo 6), y relaciónala con la pirámide de energía de la figura 28-7.

herbívoros y únicamente una caloría en carnívoros. Esta ineficiente transferencia de energía entre niveles tróficos se conoce como la "ley del 10 por ciento". Una **pirámide de energía**, que muestra la energía máxima en la base y cantidades constantemente menguantes en los niveles más altos, ilustra en forma gráfica las relaciones energéticas entre los niveles tróficos (FIGURA 28-7). Los ecólogos utilizan a veces la biomasa como medida de la energía almacenada en cada nivel trófico. Puesto que el peso seco del cuerpo de los organismos de cada nivel trófico es aproximadamente proporcional a la cantidad de energía almacenada en los organismos de ese nivel, la *pirámide de biomasa* de una comunidad específica suele tener la misma forma general que su pirámide de energía.

¿Qué significa esto en relación con la estructura de la comunidad? Si diéramos un paseo por un ecosistema no alterado, advertiríamos que los organismos que predominan son plantas. Las plantas son los organismos que disponen de más energía porque la captan directamente de la luz solar. Los animales más abundantes son los que se alimentan de plantas, en tanto que los carnívoros son relativamente escasos. La ineficiencia de la transferencia de energía tiene importantes implicaciones para la producción de alimento para los humanos. Cuanto más bajo sea el nivel trófico que utilicemos, tanta más energía alimentaria tendremos disponible para nuestro consumo; en otras palabras, se puede alimentar a un número mucho mayor de personas con cereales que con carne.

Un lamentable efecto colateral de la ineficiencia de la transferencia de energía, vinculado con la producción y liberación de sustancias químicas tóxicas por los seres humanos, es que ciertas sustancias tóxicas persistentes se concentran en el cuerpo de los carnívoros, incluidos los seres humanos, como se describe en la sección "Guardián de la Tierra: Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias".

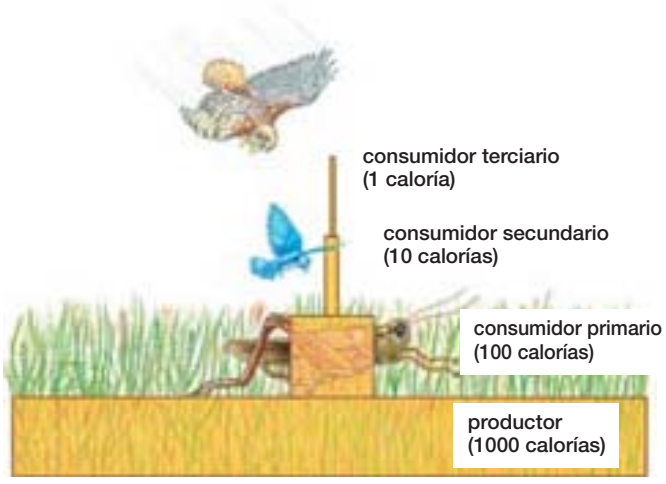


FIGURA 28-7 Pirámide de energía de un ecosistema de pradera
La dimensión de cada rectángulo es proporcional a la energía almacenada en ese nivel trófico. Una pirámide de biomasa de este ecosistema tendría una apariencia muy similar.

Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias

BIOÉTICA

En la década de 1940, las propiedades del nuevo insecticida DDT parecían casi milagrosas. En las zonas tropicales, el DDT salvó millones de vidas al matar los mosquitos transmisores del paludismo. Los mayores rendimientos agrícolas que se obtuvieron al destruir plagas de insectos con DDT salvaron a muchos millones de personas más de morir de inanición. Pero el DDT estaba entrando en las cadenas alimentarias y destruyendo la compleja red de la vida. Por ejemplo, a mediados de la década de 1950, la Organización Mundial de la Salud roció DDT en la isla de Borneo para combatir el paludismo. Una oruga que se alimentaba de los techos de paja de las casas sufrió relativamente pocos efectos adversos, pero una avispa depredadora que se alimentaba de las orugas fue exterminada por el DDT. Los techos de paja se vinieron abajo, devorados por las orugas que se multiplicaron sin control. Las lagartijas que comían los insectos envenenados acumularon altas concentraciones de DDT en su cuerpo. Tanto las lagartijas como los gatos de aldea que se las comieron murieron intoxicados con DDT. Ya sin los gatos, la población de ratas se multiplicó explosivamente, y las aldeas enfrentaron la amenaza de un brote de peste bubónica transmitida por las poblaciones de ratas que crecían sin control. Se evitó el brote llevando nuevos gatos a las aldeas por vía aérea.

En Estados Unidos, durante las décadas de 1950 y 1960, se registró una alarmante disminución de las poblaciones de varias aves depredadoras, especialmente de las que se alimentan de peces como el águila calva, el cormorán, el quebrantahuesos y el pelícano pardo. Estos grandes depredadores nunca han sido abundantes, y la disminución llevó a algunos, como el pelícano pardo y el águila calva, al borde de la extinción (aunque todos ellos han registrado una significativa recuperación desde que el pesticida fue prohibido en Estados Unidos en 1973). Los ecosistemas acuáticos que brindaban sustento a estas aves habían sido rociados con cantidades relativamente pequeñas de DDT para combatir los insectos. Los científicos quedaron muy sorprendidos al encontrar en el cuerpo de las aves depredadoras concentraciones de DDT hasta un millón de veces mayores que la concentración presente en el agua. Esto llevó al descubrimiento de la **amplificación biológica**, que es el proceso de acumulación de sustancias tóxicas en concentraciones cada vez mayores en los animales que ocupan niveles tróficos progresivamente más altos.

El plaguicida DDT y muchas otras sustancias elaboradas por el hombre que experimentan amplificación biológica comparten dos propiedades que los hacen peligrosos. En primer término, los organismos descomponedores no las degradan fácilmente para convertirlas en sustancias inocuas, es decir, no son **biodegradables**. En segundo lugar, tienden a almacenarse en el cuerpo, en especial en las grasas, acumulándose a lo largo de los años en el cuerpo de los animales que viven más. La exposición a altos niveles de pesticidas y otros contaminantes persistentes se ha vinculado con algunos tipos de cáncer, infertilidad, enfermedades cardiacas, supresión de la función inmunitaria y daño neurológico en los niños.

En la actualidad la contaminación por mercurio es una causa que despierta especial preocupación. El mercurio es una neurotoxina extremadamente potente que se acumula tanto en los músculos como en los tejidos adiposos. Su nivel de acumulación en peces depredadores que consume el hombre es tan alto que la Agencia para Fármacos y Alimentos (Food and Drug Administration, FDA) de Estados Unidos ha aconsejado a las mujeres en edad reproductiva o que tienen hijos pequeños que no coman pez espada ni tiburón, y que limiten el consumo de atún albacora (también conocido como atún blanco), porque estos longevos depredadores que habitan en los océanos han acumulado suficiente mercurio para provocar daño a la salud. En Estados Unidos las plantas de energía eléctrica alimentadas con carbón son la fuente individual más grande de contaminación por mercurio; el mercurio atmosférico puede propagarse a miles de kilómetros a la redonda y depositarse en lugares que anteriormente eran ambientes prístinos, como el Ártico. Aproximadamente la mitad del mercurio depositado en el suelo y el agua de Estados Unidos proviene del extranjero. Los investigadores han reportado daño neurológico, incluido un bajo cociente intelectual, en correspondencia con elevados niveles de mercurio en muestras del cabello de las madres en dos diferentes poblaciones isleñas que consumen gran cantidad de peces oceánicos y mamíferos. Los nativos inuit, que viven al norte del Círculo Ártico, tienen altos niveles de mercurio y otros contaminantes bioacumulables por el consumo de grandes cantidades de peces y mamíferos que son depredadores marinos.

Un tipo de sustancias químicas llamadas *perturbadores endocrinos* —que incluyen algunos pesticidas, ftalatos o ésteres de ftalato (que hacen más flexibles a los plásticos) y retardadores de combustión— se han difundido ampliamente en el ambiente. Al igual que el DDT, se acumulan en las grasas e imitan o interfieren con la acción de las hormonas animales. Hay fuerte evidencia de que estos químicos interfieren con la reproducción y el desarrollo de los peces (incluido el salmón), las aves que comen peces como los cormoranes (**FIGURA E28-1**), ranas, salamandras, caimanes y muchos otros animales. También se cree que los perturbadores endocrinos son la causa de menores cantidades de espermatozoides en los seres humanos.

Para reducir los daños a la salud de los humanos y la pérdida de la vida silvestre, debemos entender las propiedades de los contaminantes y el funcionamiento de las redes alimentarias. Cuando comemos atún o pez espada, por ejemplo, actuamos como consumidores terciarios o incluso cuaternarios, por lo cual somos vulnerables a las sustancias bioacumulables. Por añadidura, nuestra larga vida permite que las sustancias que se almacenan en nuestro cuerpo se acumulen durante más tiempo, hasta alcanzar niveles tóxicos.

FIGURA E28-1 El precio de la contaminación
Las deformidades como el pico retorcido de este cormorán de doble cresta del lago Michigan se vinculan con sustancias químicas bioacumulables. Las anormalidades del aparato reproductor y el sistema inmunitario también son comunes en muchos tipos de organismos expuestos a estos contaminantes. Los animales depredadores son especialmente vulnerables por el efecto de la amplificación biológica.

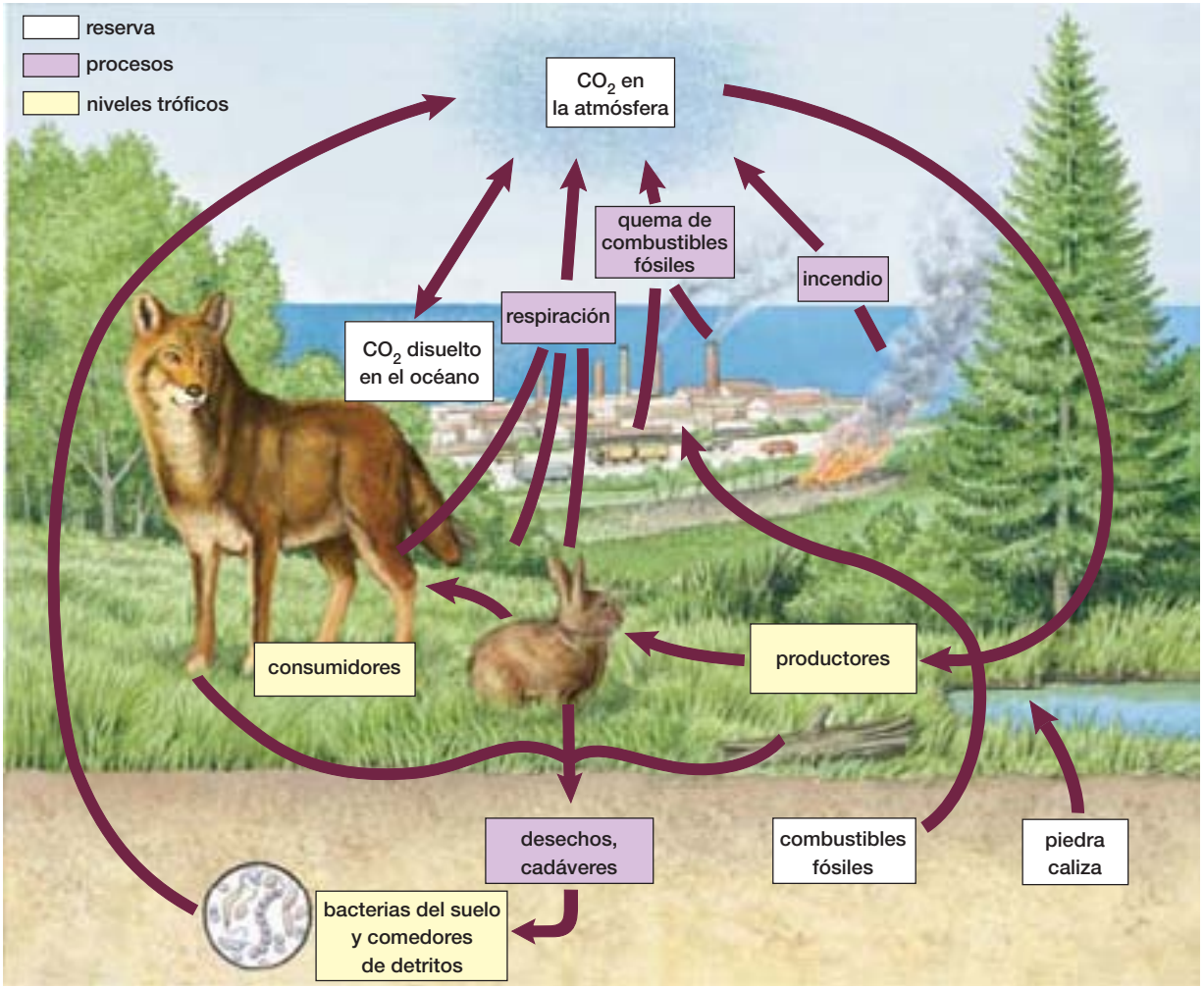


FIGURA 28-8 Ciclo del carbono

28.3 ¿CÓMO SE DESPLAZAN LOS NUTRIMENTOS DENTRO DE LOS ECOSISTEMAS Y ENTRE ELLOS?

En contraste con la energía de la luz solar, los nutrimentos no descienden sobre la Tierra en un flujo continuo desde lo alto. En términos prácticos, la misma reserva común de nutrimentos ha sostenido la vida durante más de 3000 millones de años. Los *nutrimentos* son los elementos y las pequeñas moléculas que constituyen todos los componentes básicos de la vida. Los organismos necesitan de algunos de ellos, llamados *macronutrimentos*, en grandes cantidades; por ejemplo, agua, carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, azufre y calcio. Los *micronutrimentos*, como cinc, molibdeno, hierro, selenio y yodo, son necesarios sólo en muy pequeñas cantidades. Los **ciclos de nutrimentos**, también llamados **ciclos biogeoquímicos**, describen las trayectorias que siguen estas sustancias durante su tránsito de las comunidades a las partes inanimadas de los ecosistemas y luego de regreso a las comunidades.

Las fuentes y los lugares de almacenamiento de nutrimentos se denominan **reservas**. Las reservas principales se encuentran generalmente en el ambiente inanimado, o abiótico. Por ejemplo, existen varias reservas importantes de carbono: este elemento se almacena como dióxido de carbono en la atmósfera, en solución en los océanos, en forma de roca como en las piedras calizas y en forma de combustibles fósiles en el subsuelo. En el siguiente apartado describiremos brevemente los ciclos del carbono, del nitrógeno, del fósforo y del agua.

El ciclo del carbono pasa por la atmósfera, los océanos y las comunidades

El marco estructural de todas las moléculas orgánicas, que son los componentes básicos de la vida, está formado de cadenas de átomos de carbono. El carbono entra en la comunidad viviente cuando los productores captan dióxido de carbono (CO_2) durante la fotosíntesis. En tierra, los productores obtienen CO_2 de la atmósfera, donde representa apenas el 0.036 por ciento de la cantidad total de gases. Los productores acuáticos del océano, como las algas y las diatomeas, encuentran abundante CO_2 para la fotosíntesis disuelto en el agua. De hecho, es mucho mayor la cantidad de CO_2 almacenado en los océanos que en la atmósfera. Los productores devuelven parte del CO_2 a la atmósfera y al océano durante la respiración celular e incorporan el resto a su cuerpo. Los consumidores primarios, como las vacas, los camarones o los gusanos del tomate, se alimentan de los productores y se apropian del carbono almacenado en sus tejidos. Estos herbívoros también liberan un poco de carbono al respirar y guardan el resto, que es consumido a veces por organismos de niveles tróficos más elevados. Todos los seres vivos mueren tarde o temprano, y los comedores de detritos y descomponedores se encargan de degradar su cuerpo. La respiración celu-

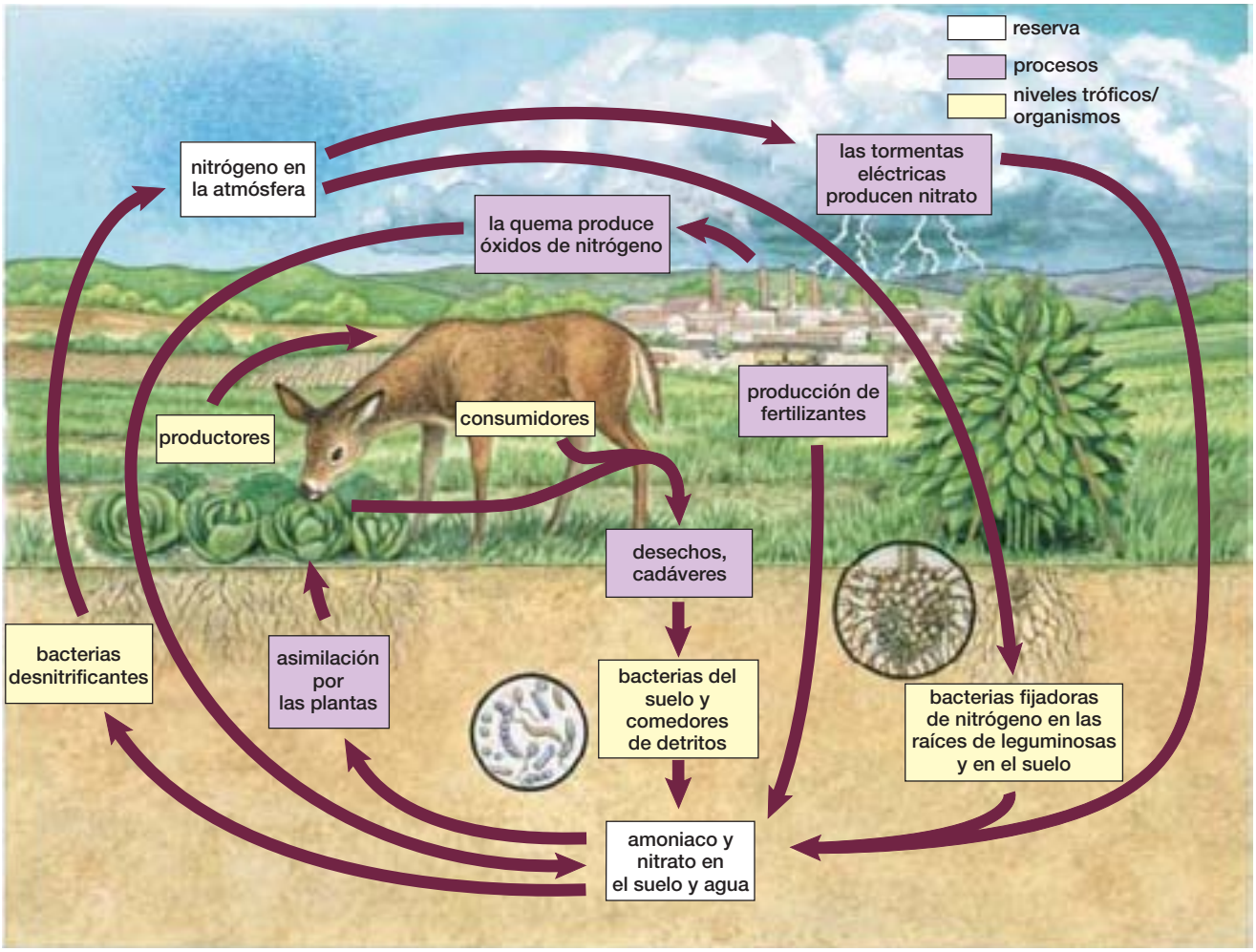

reserva
procesos
niveles tróficos/ organismos
nitrógeno en la atmósfera
las tormentas eléctricas producen nitrato
la quema produce óxidos de nitrógeno
producción de fertilizantes
productores
consumidores
desechos, cadáveres
bacterias desnitrificantes
asimilación por las plantas
bacterias del suelo y comedores de detritos
bacterias fijadoras de nitrógeno en las raíces de leguminosas y en el suelo
amoniaco y nitrato en el suelo y agua

FIGURA 28-9 Ciclo del nitrógeno
PREGUNTA: ¿Qué incentivos provocaron que los seres humanos captaran el nitrógeno del aire y lo incorporaran al ciclo del nitrógeno? ¿Cuáles son algunas consecuencias del aumento por parte de los humanos del ciclo del nitrógeno?

lar de estos organismos devuelve CO_2 a la atmósfera y a los océanos. El dióxido de carbono transita libremente entre estas dos grandes reservas (**FIGURA 28-8**).

Parte del carbono tiene un ciclo más lento. Por ejemplo, los moluscos y los organismos microscópicos marinos extraen el CO_2 disuelto en el agua y lo combinan con calcio para formar carbonato de calcio ($CaCO_3$), con el que construyen sus conchas. Cuando estos organismos mueren, sus conchas se acumulan en depósitos submarinos, son sepultadas y con el tiempo se transforman en piedra caliza. A veces los sucesos geológicos dejan expuesta la piedra caliza, que se disuelve poco a poco por efecto de las corrientes que corren sobre ella, con lo cual el carbono vuelve a estar disponible para los organismos vivos.

Otro segmento de larga duración del ciclo del carbono es la producción de combustibles fósiles. Los **combustibles fósiles** veles tróficos antes de quedar atrapada en los hidrocarburos de alta energía que quemamos actualmente. Cuando quemamos combustibles fósiles para aprovechar esta energía almacenada, se libera CO_2 en la atmósfera. Además de la quema de combustibles fósiles, las actividades humanas como la tala y quema de los grandes bosques del planeta (donde hay mucho carbono almacenado), están incrementando la cantidad de CO_2 presente en la atmósfera, como se describirá más adelante en este mismo capítulo.

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera

La atmósfera contiene alrededor de un 78 por ciento de nitrógeno gaseoso (N_2) y, por lo tanto, constituye la principal reserva de este importante nutrimento. El nitrógeno es un componente fundamental de las proteínas, de muchas vitaminas y de los ácidos nucleicos DNA y RNA. Un hecho interesante es que ni las plantas ni los animales pueden extraer este gas de la atmósfera. Por consiguiente, las plantas necesitan una provisión de nitrato (NO_3^-) o amoniaco (NH_3

el trébol y los guisantes), donde viven en protuberancias especiales de las raíces. Las leguminosas crecen extensivamente en los plantíos, donde fertilizan el suelo. Las bacterias descomponedoras también producen amoniaco a partir de los aminoácidos y la urea presentes en los cadáveres y desechos. Otras bacterias transforman el amoniaco en nitrato.

Las tormentas eléctricas, los incendios forestales y la quema de combustibles fósiles combinan el nitrógeno con el oxígeno, mediante procesos no biológicos, para producir óxidos de nitrógeno. Los fertilizantes sintéticos a menudo contienen amoniaco, nitrato o ambos. Las plantas incorporan el nitrógeno del amoniaco y del nitrato en sus aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y vitaminas. Estas moléculas nitrogenadas de la planta son consumidas tarde o temprano, ya sea por consumidores primarios, comedores de detritos o descomponedores. A medida que recorre la red alimentaria, parte del nitrógeno queda en libertad en los desechos y cadáveres, donde las bacterias descomponedoras presentes en el suelo y el agua lo convierten de nuevo en nitrato y amoniaco. Esta forma de nitrógeno queda disponible para las plantas; los nitratos y el amoniaco en el suelo y el agua constituyen una segunda reserva. El ciclo del nitrógeno se completa por el continuo retorno del nitrógeno a la atmósfera gracias a las *bacterias desnitrificantes*. Estos habitantes de los suelos húmedos, los pantanos y los estuarios descomponen el nitrato y devuelven nitrógeno gaseoso a la atmósfera (**FIGURA 28-9**).

Los compuestos nitrogenados producidos por los seres humanos ahora dominan el ciclo del nitrógeno, creando serios problemas ambientales. Cuando entran a los ecosistemas, estos compuestos con exceso de nitrógeno cambian la composición de las comunidades vegetales o las fertilizan excesivamente, o destruyen las comunidades de los bosques y de los cuerpos de agua dulce, al volver más ácido el ambiente, como estudiaremos más adelante en este mismo capítulo.

El ciclo del fósforo carece de componentes atmosféricos

El fósforo es un componente fundamental de las moléculas biológicas, entre ellas las moléculas de transferencia de energía (ATP y NADP), los ácidos nucleicos y los fosfolípidos de las membranas celulares. Asimismo, el fósforo es uno de los componentes principales de los dientes y huesos de los vertebrados. En contraste con los ciclos del carbono y del nitrógeno, el ciclo del fósforo carece de componente atmosférico. La reserva principal de fósforo de los ecosistemas es la roca, donde se encuentra unido al oxígeno en forma de fosfato. Las rocas ricas en fosfato expuestas a la intemperie se erosionan y la lluvia disuelve el fosfato. El fosfato disuelto es absorbido fácilmente a través de las raíces de las plantas y por otros autótrofos, como los protistas y las cianobacterias fotosintéticos, que lo incorporan a las moléculas biológicas. A partir de estos productores, el fósforo recorre las redes alimentarias (**FIGURA 28-10**). En cada nivel se excreta el fosfato excedente. Finalmente, los comedores de detritos y los descomponedores devuelven el fósforo residual de los cadáveres al suelo y al agua en forma de fosfato, de donde puede ser absorbido de nuevo por los autótrofos o quedar unido a los sedimentos y, con el tiempo, incorporarse de nuevo a la roca.

Parte del fosfato disuelto en el agua dulce es transportado a los océanos. Aunque gran parte de este fosfato termina en

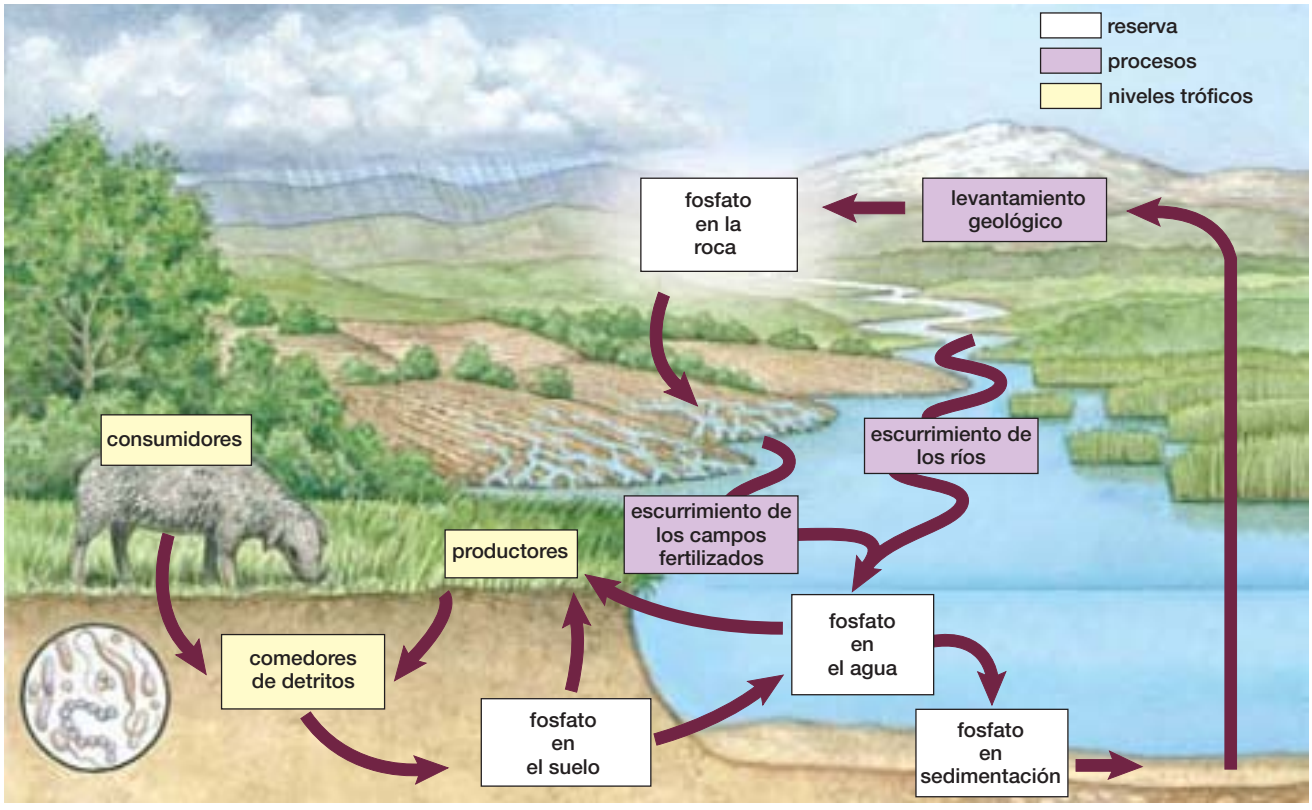
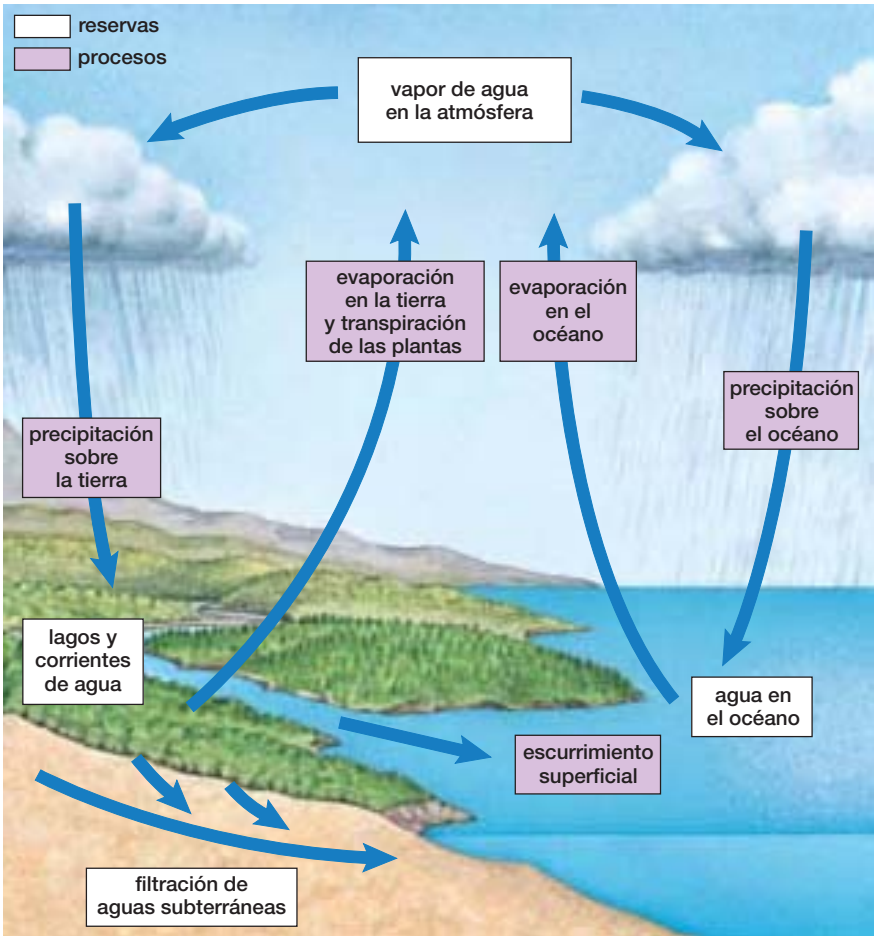


FIGURA 28-11 Ciclo hidrológico


reservas
procesos
vapor de agua en la atmósfera
evaporación en la tierra y transpiración de las plantas
evaporación en el océano
precipitación sobre el océano
precipitación sobre la tierra
lagos y corrientes de agua
agua en el océano
escurrimiento superficial
filtración de aguas subterráneas

los sedimentos marinos, un poco de él es absorbido por los productores marinos y, con el tiempo, se integra al cuerpo de vertebrados y peces. Algunos de éstos, a la vez, sirven de alimento a las aves marinas, que excretan grandes cantidades de fósforo en la tierra. Hubo una época en que se explotaba el guano (excremento) que las aves marinas depositaban a lo largo de la costa occidental de América del Sur, el cual constituía una de las fuentes principales de fósforo del mundo. También se explotan las rocas ricas en fosfatos, que se emplean para producir fertilizantes. El suelo que se erosiona de los campos fertilizados arrastra grandes cantidades de fosfatos hacia lagos, corrientes de agua y el mar, donde estimula el crecimiento de productores. En los lagos el agua rica en fósforo que escurre de la tierra estimula un crecimiento tan abundante de algas y bacterias, que se trastornan las interacciones naturales en la comunidad del lago.

La mayor parte del agua no sufre cambios químicos durante su ciclo

El ciclo del agua, o **ciclo hidrológico** (FIGURA 28-11), difiere de casi todos los demás ciclos de nutrimentos en que la mayor parte del agua permanece como tal durante todo el proceso y no se utiliza en la síntesis de nuevas moléculas. La reserva principal de agua es el océano, que cubre alrededor de tres cuartas partes de la superficie terrestre y contiene más del 97 por ciento del agua disponible. Otro 2 por ciento se encuentra en forma de hielo, y el 1 por ciento restante corresponde a los cuerpos de agua dulce. Los motores del ciclo hidrológico son la energía solar, que evapora el agua, y la gravedad, que trae el agua de vuelta a la Tierra en forma de precipitación (lluvia, nieve, aguanieve y rocío). La evaporación tiene lugar principalmente en los océanos, y buena parte del agua regresa de forma directa a ellos por medio de la lluvia. El agua que cae en tierra sigue varias rutas. Un poco de agua se evapora del suelo, los lagos y las corrientes de agua. Una fracción escurre de la tierra y vuelve a los océanos, en tanto que una pequeña cantidad penetra hasta los depósitos subterráneos. Como el cuerpo de los seres vivos contiene alrededor de un 70 por ciento de agua, parte del agua del ciclo hidrológico se incorpora a las comunidades vivientes de los ecosistemas. Las raíces de las plantas absorben agua, que en buena parte se evapora de las hojas y regresa a la atmósfera. Una pequeña cantidad se combina con dióxido de carbono durante la fotosíntesis para producir moléculas de alta energía. Tarde o temprano, estas moléculas se descomponen durante la respiración celular y el agua liberada regresa al ambiente. Los consumidores obtienen agua de sus alimentos o bebiéndola directamente.

La falta de agua disponible para irrigación y para beber es un creciente problema de la humanidad

A medida que la población humana ha crecido, el agua dulce ha comenzado a escasear en muchas regiones del mundo. Además, el agua contaminada y sin tratar es un grave problema en los países en desarrollo, donde más de mil millones de personas la beben. Tanto en África como en India, donde la contaminación del agua representa amenazas significativas, la gente está comenzando a utilizar la luz solar para exterminar a los organismos causantes de enfermedades. Colocan el agua en botellas de plástico y las agitan para aumentar los niveles de oxígeno en el agua. Luego colocan las botellas en un lugar soleado, para que la combinación de oxígeno, calor y luz ultravioleta (UV) forme radicales libres que destruyen las bacterias. Sin otra tecnología que las botellas de plástico, la gente genera agua que se puede beber de forma segura.

En la actualidad aproximadamente el 10 por ciento de los alimentos en el mundo crecen en sembradíos irrigados con agua obtenida de los mantos acuíferos, que son reservas naturales subterráneas. Por desgracia, en muchas regiones del mundo, como China, India, África septentrional y la parte central norte de Estados Unidos, se "explota" esta agua subterránea; es decir, se extrae más rápidamente de lo que se repone. Gran parte de los mantos acuíferos de las Altas Planicies, desde el noroeste de Texas al sur de Dakota, se ha agotado en un 50 por ciento. En India, dos tercios de los cultivos crecen gracias a que se utiliza el agua subterránea para su irrigación, pero los mantos acuíferos se drenan más rápidamente de lo que se reponen. Una solución prometedora es

FIGURA 28-12 Una sustancia natural fuera de lugar
Esta águila calva murió a consecuencia de un derrame de petróleo cerca de la costa de Alaska.

idear formas de captar el agua de las intensas lluvias monzónicas, cuyas aguas se vierten por lo general en los ríos y que finalmente va a dar al océano. Los habitantes de un pueblo en India descubrieron que si se cava una serie de estanques, es posible captar el agua de lluvia que, de otra manera, escurriría por la tierra. Este sistema permite que el agua penetre en el suelo y ayude a reabastecer las reservas subterráneas de agua. Durante la estación seca, la gente puede utilizar estos suministros para regar los cultivos.

28.4 ¿A QUÉ SE DEBE LA LLUVIA ÁCIDA?

Muchos de los problemas ambientales que aquejan a la sociedad moderna son consecuencia de la interferencia humana en el funcionamiento de los ecosistemas. Los pueblos primitivos se sostenían únicamente de la energía proveniente del Sol y producían desechos que se reintegraban sin dificultad a los ciclos de los nutrimentos. Sin embargo, conforme la población humana crecía y la tecnología avanzaba, los seres humanos comenzamos a actuar con creciente independencia respecto de estos procesos naturales. La Revolución Industrial, que se impuso con toda su fuerza a mediados del siglo XIX, dio por resultado un enorme incremento de nuestra dependencia de la energía extraída de los combustibles fósiles (en vez de la proveniente de la luz solar) para calentar, iluminar y transportar, así como para la agricultura y las diversas industrias. Al explotar y transportar estos combustibles, hemos expuesto a los ecosistemas a una variedad de sustancias que son extrañas y a menudo tóxicas para ellos (**FIGURA 28-12**). En los siguientes apartados describiremos dos problemas ambientales de proporciones planetarias que son resultado directo de la dependencia humana respecto de los combustibles fósiles: la sedimentación ácida y el calentamiento global.

FIGURA 28-13 La sedimentación ácida es corrosiva
La sedimentación ácida está disolviendo esta escultura de piedra caliza de la catedral de Rheims, en Francia.

La sobrecarga de los ciclos del nitrógeno y del azufre es la causa de la lluvia ácida

Aunque los volcanes, las aguas termales y los organismos encargados de la descomposición liberan dióxido de azufre, las actividades industriales que queman combustibles fósiles que contienen azufre generan el 75 por ciento de las emisiones de dióxido de azufre del mundo. Esto es mucho más de lo que los ecosistemas naturales son capaces de absorber y reciclar. El ciclo del nitrógeno también se ha visto rebasado. Aunque los procesos naturales —como la actividad de las bacterias que reponen el nitrógeno y de los organismos descomponedores, los incendios y los relámpagos— producen óxidos de nitrógeno y amoniaco, aproximadamente el 60 por ciento del nitrógeno disponible para los ecosistemas del mundo ahora es resultado de las actividades humanas. La quema de combustibles fósiles combina el nitrógeno atmosférico con el oxígeno, y produce la mayor parte de las emisiones de óxidos de nitrógeno. En las zonas agrícolas, el amoniaco y el nitrato a menudo provienen de fertilizantes químicos producidos mediante el uso de la energía contenida en los combustibles fósiles para convertir el nitrógeno atmosférico en compuestos que las plantas pueden utilizar.

A finales de la década de 1960 se identificó la producción excesiva de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre como la causa de una creciente amenaza ambiental: la *lluvia ácida* o, en términos más precisos, la **sedimentación ácida**. Al combinarse con el vapor de agua de la atmósfera, los óxidos de nitrógeno se transforman en ácido nítrico y el dióxido de azufre, en ácido sulfúrico. Algunos días después, y con frecuencia a cientos de kilómetros de la fuente, los ácidos se precipitan y corroen las estatuas y los edificios (**FIGURA 28-13**), dañan los árboles y los cultivos y dejan los lagos sin vida. El ácido sulfúrico forma partículas que nublan visiblemente el aire,

incluso en condiciones de sequedad. En Estados Unidos, el noreste, la región media del Atlántico, la parte central norte y las regiones altas del oeste, al igual que Florida, son las más vulnerables, porque las rocas y los suelos que ahí predominan no amortiguan la acidez.

La sedimentación ácida daña la vida en lagos y bosques

En los montes Adirondack del estado de Nueva York, la lluvia ácida ha provocado que aproximadamente el 25 por ciento de todos los lagos y estanques sean ya demasiado ácidos para permitir la vida de peces en ellos. Pero antes de que los peces mueran, se destruye gran parte de la red alimentaria que les da sustento. Primero mueren las almejas, los caracoles, los langostinos y las larvas de insectos, después los anfibios y finalmente los peces. El resultado es un lago cristalino: hermoso, pero muerto. Los efectos no se limitan a los organismos acuáticos. La lluvia ácida también altera el crecimiento y el rendimiento de muchos cultivos agrícolas porque al penetrar en el suelo disuelve y arrastra consigo nutrimentos indispensables, como el calcio y el potasio, al tiempo que mata los microorganismos descomponedores, con lo cual impide el retorno de nutrimentos al suelo. Las plantas, envenenadas y privadas de nutrimentos, se debilitan y quedan a merced de las infecciones y el ataque de los insectos. En las alturas de los Montes Verdes de Vermont, los científicos han sido testigos de la muerte de alrededor de la mitad de las piceas rojas y hayas y de un tercio de los arces de azúcar desde 1965. La nieve, la lluvia y la espesa niebla, que comúnmente cubren estas cumbres orientales, son muy ácidas. En una estación de control situada en la cima del monte Mitchell, en Carolina del Norte, el pH de la niebla ha registrado valores de 2.9, lo que significa que es más ácida que el vinagre (**FIGURA 28-14**).

La sedimentación ácida aumenta la exposición de los organismos a los metales tóxicos, como aluminio, mercurio, plomo y cadmio, entre otros, que son mucho más solubles en agua acidificada que en agua de pH neutro. El aluminio que se disuelve de las rocas inhibe el crecimiento de las plantas y mata los peces. Se ha encontrado que, en ocasiones, el agua que se distribuye a los hogares está peligrosamente contaminada con plomo, disuelto por el agua ácida de la soldadura de plomo de tuberías antiguas. En el cuerpo de los peces que viven en aguas acidificadas se han encontrado niveles peligrosos de mercurio, elemento que queda sometido al efecto de *amplificación biológica* conforme recorre los niveles tróficos (véase la sección "Guardián de la Tierra: Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias").

FIGURA 28-14 La sedimentación ácida destruye los bosques
La lluvia y la niebla ácidas han destruido este bosque situado en la cima del monte Mitchell, en Carolina del Norte.

La Ley del Aire Limpio ha reducido significativamente las emisiones de azufre, pero no las de nitrógeno

En Estados Unidos las enmiendas a la Ley del Aire Limpio en 1990 dieron por resultado una sustancial reducción de las emisiones de dióxido de azufre y de óxidos de nitrógeno de las plantas generadoras de energía. Las emisiones totales de azufre han disminuido considerablemente en ese país, mejorando la calidad del aire y reduciendo el nivel de acidez de la lluvia en algunas regiones. Pero la Ley del Aire Limpio no limita de manera estricta las emisiones de óxidos de nitrógeno y amoniaco. Aunque las emisiones de óxidos de nitrógeno se han reducido en algunas regiones, los compuestos de nitrógeno en la atmósfera han registrado un leve aumento en términos generales, en particular por la creciente cantidad de automóviles que queman gasolina. Las emisiones de amoniaco (NH_3), en su mayor parte provenientes de la ganadería y los fertilizantes, se han incrementado en un 19 por ciento en Estados Unidos desde 1985.

Por desgracia, los ecosistemas dañados se recuperan lentamente. Un estudio reciente de los lagos Adirondack reveló signos esperanzadores de que el 60 por ciento de sus aguas se están volviendo menos ácidas, aunque su total recuperación aún se encuentra a décadas de distancia. Algunos suelos del sureste de Estados Unidos están más saturados con sustancias ácidas y en estas zonas los niveles de ácido de las aguas dulces van en aumento. Los bosques ubicados a grandes alturas continúan en riesgo en todo el territorio de Estados Unidos. Muchos científicos creen que se necesitará una mayor reducción en las emisiones, junto con controles mucho más estrictos de las emisiones de nitrógeno, para evitar que los ecosistemas se sigan deteriorando y para permitir que aquellos que ya están dañados se recuperen.

28.5 ¿QUÉ PROVOCA EL CALENTAMIENTO GLOBAL?

La interferencia en el ciclo del carbono contribuye al calentamiento global

Durante el periodo carbonífero, que se inició hace unos 345 millones de años y concluyó hace 280 millones de años, cantidades enormes de carbono quedaron aisladas del ciclo del carbono cuando, en las condiciones calurosas y húmedas de esa época, los cuerpos de organismos prehistóricos quedaron sepultados en los sedimentos y no se descompusieron. Con el tiempo, el calor y la presión transformaron estos cuerpos, junto con la energía que habían almacenado a partir de la luz solar, en combustibles fósiles como hulla, petróleo y gas natural. Sin la intervención humana, el carbono habría permanecido bajo tierra. Pero a partir de la Revolución Industrial hemos dependido cada vez en mayor grado de la energía almacenada en estos combustibles. Un investigador estima que un tanque de gas común guarda los residuos transformados de 1000 toneladas de vida prehistórica, principalmente de organismos microscópicos de fitoplancton. Cuando quemamos los combustibles fósiles en nuestras centrales eléctricas, fábricas y automóviles, utilizamos la energía de la luz solar prehistórica y

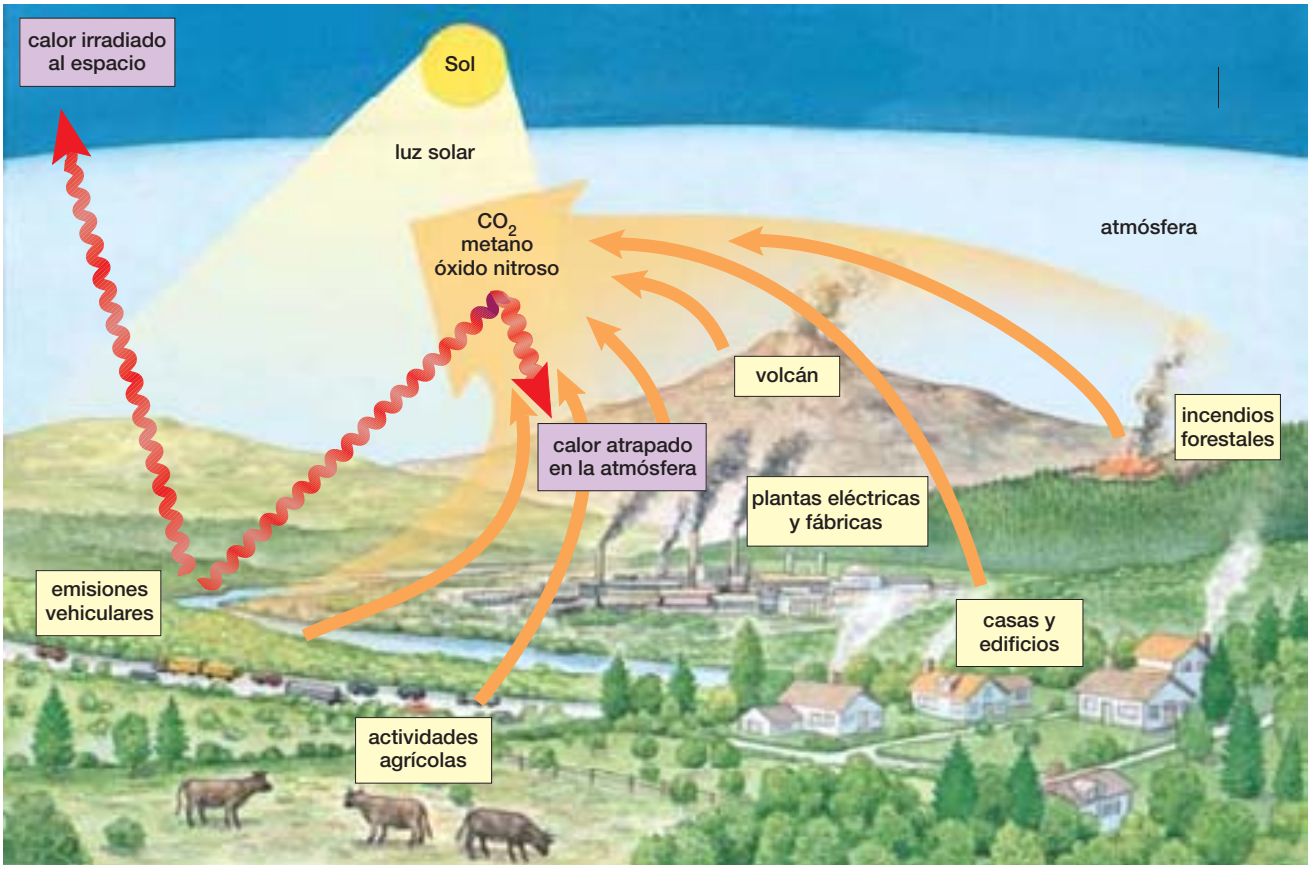


FIGURA 28-15 El aumento de las emisiones de gases de invernadero contribuye al calentamiento global
La luz solar que llega a nuestro planeta calienta la superficie terrestre y es irradiada de regreso a la atmósfera. Los gases de invernadero —liberados mediante procesos naturales, pero que se han incrementado notablemente como resultado de las actividades humanas— absorben parte de este calor, el cual queda atrapado en la atmósfera.

emitimos CO_2 a la atmósfera. A partir de 1850, el contenido de CO_2 de la atmósfera ha aumentado de 280 partes por millón (ppm) a 381 ppm, esto es, casi el 36 por ciento. De acuerdo con análisis recientes de burbujas de gas atrapadas en antiguos bloques de hielo del Antártico, el contenido de CO_2 de la atmósfera es ahora aproximadamente un 27 por ciento más alto que en cualquier otro momento durante los pasados 650,000 años, y el aumento prosigue a una razón sin precedentes de 1.5 ppm cada año. La quema de combustibles fósiles responde por un porcentaje comprendido entre el 80 y el 85 por ciento del CO_2 que se agrega a la atmósfera anualmente.

Una segunda fuente de CO_2 atmosférico adicional es la **deforestación** del planeta, que elimina decenas de millones de hectáreas de bosques cada año y responde por una cifra comprendida entre el 15 y el 20 por ciento de las emisiones de CO_2. La deforestación ocurre principalmente en los trópicos, donde las selvas tropicales se están convirtiendo a toda prisa en terrenos agrícolas marginales. El carbono almacenado en los enormes árboles de esas selvas regresa a la atmósfera (principalmente por combustión) una vez que han sido cortados.

En conjunto, las actividades humanas liberan casi 7,000 millones de toneladas de carbono (en forma de CO_2

Los gases de invernadero retienen el calor en la atmósfera

El CO_2 atmosférico actúa en cierta forma como el cristal de un invernadero: permite la entrada de energía solar y luego absorbe y retiene esa energía una vez que se ha transformado en calor (FIGURA 28-15). Hay otros **gases de invernadero** que comparten esta propiedad, como el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4), que se liberan en las actividades agrícolas, los vertederos de basura, los procesos de tratamiento de aguas residuales, la minería del carbón y la quema de combustibles fósiles. El **efecto de invernadero**, esto es, la capacidad de los gases de invernadero de atrapar la energía solar en la atmósfera de un planeta en forma de calor, es un proceso natural que, al mantener nuestra atmósfera relativamente caliente, permite la existencia de vida en la Tierra tal como la conocemos. Sin embargo, hay consenso entre los científicos respecto a que las actividades humanas han amplificado el efecto de invernadero natural y han provocado un fenómeno que se conoce como **calentamiento global**.

Los registros históricos de temperatura indican una elevación mundial de la temperatura, paralelo al aumento de CO_2 atmosférico (FIGURA 28-16

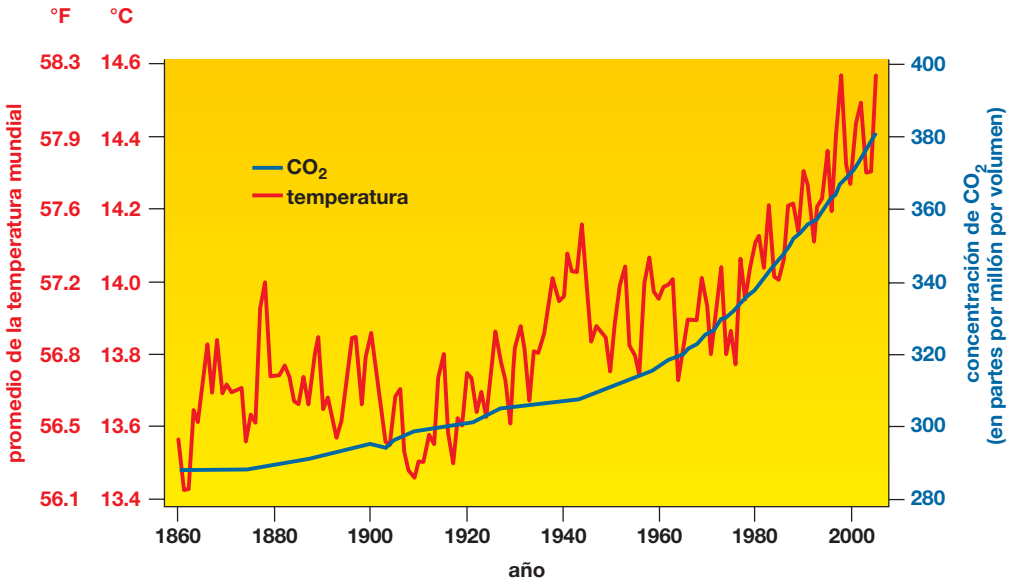


FIGURA 28-16 El calentamiento global es paralelo al aumento de CO_2
La concentración de CO_2 de la atmósfera (línea azul) ha mostrado un crecimiento constante desde 1860. Las temperaturas medias mundiales (línea roja) también se han incrementado, en forma paralela al aumento en la concentración de CO_2 en la atmósfera.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) predice que si no se restringen las emisiones de gases de invernadero, las temperaturas globales promedio se elevarán del promedio actual de 14.4°C al intervalo comprendido entre 16 y 19°C para el año 2100 (FIGURA 28-17).

Cambios aparentemente pequeños en la temperatura global pueden tener efectos considerables. Por ejemplo, las temperaturas medias del aire durante el punto culminante de la última glaciación (hace 20,000 años) fueron sólo alrededor de 5°C inferiores a las actuales. Esta elevación extremadamente rápida de la temperatura es motivo especial de preocupación porque es probable que exceda la rapidez con que la selección natural es capaz de generar adaptaciones evolutivas al cambio. Como el cambio de temperatura no tiene una distribución homogénea en todo el planeta, se prevé que en Estados Unidos y en las zonas árticas las temperaturas aumentarán considerablemente más aprisa que el promedio mundial.

El calentamiento global tendrá graves consecuencias

Como afirma, un poco en broma, el geoquímico James White de la Universidad de Colorado: "Si la Tierra tuviera un manual de uso, el capítulo sobre el clima podría comenzar con la advertencia de que el sistema ha sido ajustado de fábrica para obtener la máxima comodidad, por lo que no deben tocarse los controles". La Tierra ha comenzado a experimentar las consecuencias del calentamiento global, y todo indica que éstas serán graves y, en algunas regiones, catastróficas.

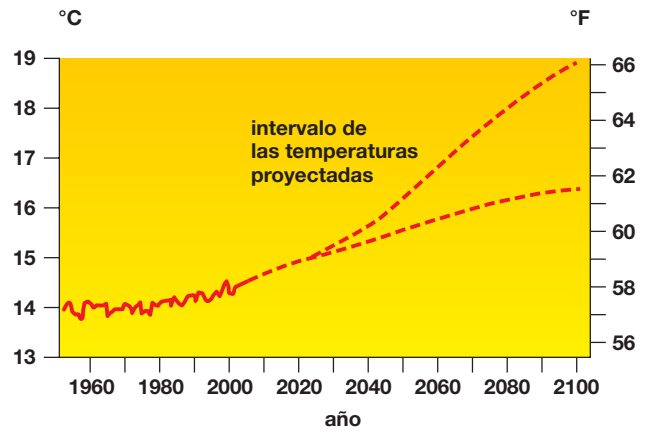


FIGURA 28-17 El intervalo de temperaturas proyectadas va en aumento

Está ocurriendo un derretimiento

En todo el mundo, el hielo se está derritiendo (véase la sección "Guardián de la Tierra: Los polos en peligro"), los glaciares se están retirando y desapareciendo (FIGURA 28-18). En el Parque Nacional de los Glaciares sólo quedan 35 de los 150 glaciares que alguna vez cubrieron las laderas de las montañas; los científicos estiman que todos estos glaciares terminarán por desaparecer en los próximos 30 años. La capa de hielo de Groenlandia se está derritiendo con el doble de rapidez que hace una década, liberando 221 kilómetros cúbicos de agua al Océano Atlántico cada año. Conforme los casquetes polares y los glaciares se derritan y las aguas de los océanos se expandan en respuesta al calentamiento atmosférico, los niveles de los mares se elevarán, poniendo en peligro las ciudades costeras e inundando las tierras húmedas de los litorales. El *permafrost* o permahielo (la capa subterránea de hielo) de Alaska se está derritiendo, lanzando lodo a los ríos, destruyendo las zonas de desove del salmón y liberando CO_2 a la atmósfera conforme la materia orgánica atrapada se descompone. En Siberia, una región de turba congelada del tamaño de Francia y Alemania en conjunto se está derritiendo, creando ciénagas gigantescas que podrían liberar miles de millones de toneladas de metano (un gas que atrapa calor y que es mucho más potente que el CO_2) a la atmósfera. El *permafrost* que se derrite es un ejemplo de retroalimentación positiva, en el que un resultado del calentamiento global, en este caso la liberación de gases de invernadero adicionales, acelera el proceso de calentamiento.

Se prevé un clima más extremoso

FIGURA 28-18 Los glaciares se están derritiendo
Fotografías tomadas desde el mismo punto en 1904 (arriba) y 2004 (abajo) documentan el retiro del glaciar Carroll en la bahía Glacier, Alaska.

durante los últimos 35 años, tanto la intensidad como la duración de los huracanes se han incrementado en un 50 por ciento, duplicando la rapidez del viento y la destrucción en las categorías más altas (categorías 4 y 5), como sucedió con el huracán Katrina, que devastó la ciudad de Nueva Orleáns en 2005. Los expertos predicen que, a medida que el mundo se calienta, las sequías durarán más y serán más severas, mientras que otras regiones sufrirán inundaciones. Los científicos del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica de Estados Unidos reportan que desde la década de 1970, el área de la Tierra que recibe los efectos de sequías severas se ha duplicado del 15 al 30 por ciento como resultado del aumento de temperaturas y la disminución de las lluvias locales. Las consecuencias en la agricultura como resultado del clima extremoso podrían ser desastrosas para las naciones que apenas consiguen alimentar a sus habitantes.

La vida silvestre resulta afectada

los bosques podrían ser profundas. Los incendios, alimentados por la sequía y los bosques demasiado densos resultado de la supresión de incendios en el pasado, han arrasado con extensas áreas del oeste de Estados Unidos y Alaska, liberando aún más dióxido de carbono a la atmósfera. Conforme el mundo se calienta, la distribución de los árboles cambiará, con base en su tolerancia al calor. Por ejemplo, los maples de azúcar podrían desaparecer de los bosques del noreste de Estados Unidos, mientras que los bosques del sureste podrían ser remplazados por pastizales. Es probable que los arrecifes de coral, ya en tensión por las actividades humanas, sufran aún más daños por las aguas más calientes, que eliminarán las algas simbióticas que les proveen energía. Los corales se enfrentan a mayores amenazas porque, conforme los océanos absorben más CO_2, las aguas se están volviendo más ácidas, lo que dificulta que los corales formen sus esqueletos calizos.

Los reportes de cambios provienen de todo el mundo. En Europa la temporada de crecimiento de las plantas ha aumentado en más de 10 días a lo largo de los últimos 28 años. Los arrendajos mexicanos del sur de Arizona están anidando 10 días antes que en 1971. Muchas especies de mariposas y aves han desplazado sus dominios hacia el norte. En el Reino Unido y el noreste de Estados Unidos, las flores de primavera están floreciendo más pronto. Aunque cada informe individual podría atribuirse a otros factores, el peso acumulado de los datos de diversas fuentes de todo el mundo constituye un fuerte indicio de que ya se han iniciado cambios biológicos relacionados con el calentamiento. También se prevé que el calentamiento global incremente las poblaciones de organismos que transmiten enfermedades tropicales, como los mosquitos transmisores del paludismo, lo que tendrá consecuencias negativas para la salud de la humanidad.

¿Cómo está respondiendo la humanidad a esta amenaza?

GUARDIÁN DE LA TIERRA

Los polos en peligro

BIOÉTICA

En los polos opuestos de la Tierra, el Ártico y el Antártico, el hielo se está derritiendo. La península Antártica es vulnerable de forma singular al calentamiento global porque su temperatura promedio a lo largo del año se acerca al punto de congelación del agua. En los últimos 50 años, la temperatura alrededor de la península se ha incrementado aproximadamente unos 2.5°C, mucho más rápido que el promedio global. Desde 1995, unos 5,180 kilómetros cuadrados de plataformas de hielo de la península Antártica se han desintegrado; de acuerdo con muestras de hielo, los científicos creen que estas plataformas habían existido durante miles de años. La pérdida de las plataformas flotantes de hielo tiene consecuencias de gran alcance. El hielo del mar crea condiciones que favorecen el abundante crecimiento del fitoplancton y las algas. Estos productores primarios proveen alimento a las larvas de krill, unos crustáceos semejantes a los camarones que son una especie clave en la red alimentaria del Antártico. El krill constituye una porción importante de la dieta de las focas, los pingüinos y varias especies de ballenas. Pero durante los últimos 30 años, las poblaciones de krill en el suroeste del Atlántico han disminuido aproximadamente en un 80 por ciento. Angus Atkinson, investigador del instituto British Antarctic Survey, considera que la disminución está vinculada con la pérdida de hielo del mar. Un escenario probable es que conforme las plataformas de hielo se reducen, las algas que crecen debajo de ellas no lograrán sobrevivir, por lo que el krill que depende de esas algas morirá de inanición. Los investigadores están preocupados de que la desaparición del krill repercuta en la cadena alimentaria, provocando la muerte por inanición de ballenas, focas y pingüinos. Los pingüinos de Adelia pasan sus inviernos en las plataformas de hielo del Antártico, alimentándose de krill. Aunque la mayor parte de las poblaciones de pingüinos del Antártico permanecen saludables, el investigador William Fraser, quien ha estudiado a los pingüinos del Antártico durante 30 años, reporta que la población de los pingüinos de Adelia en la zona occidental de la península Antártica ha perdido unas 10,000 parejas en edad reproductiva desde 1975.

En los confines de la Tierra, las temperaturas árticas se han elevado casi el doble de rápido que la temperatura promedio en el mundo, provocando una disminución del 20 al 30 por ciento del hielo del mar ártico de finales del verano durante los últimos 30 años. Se prevén mayores cambios para el próximo siglo, incluyendo aumentos de temperatura de 4 a 8°C. En un perturbador ejemplo de retroalimentación positiva, el hielo que se derrite acelerará el calentamiento, porque el hielo refleja entre el 80 y el 90 por ciento de la energía solar que choca contra él, pero el agua del océano expuesta cuando el hielo desaparece absorbe la mayor parte de la energía solar, convirtiéndola en calor.

El hielo del mar Ártico es esencial para los osos polares y las focas anilladas, su principal fuente de alimento. La pérdida total del hielo marino, que algunos científicos creen que ocurrirá durante el próximo siglo, significaría la extinción casi segura de los osos polares en vida silvestre. En la bahía de Hudson en Canadá, el hielo del mar se está rompiendo tres semanas antes de lo que lo hacía hace 30 años, privando a los osos de la primera oportunidad de cazar focas anilladas sobre el hielo (**FIGURA E28-2**). Como resultado, los osos polares de la bahía de Hudson ahora comienzan el verano con un 15 por ciento menos de su peso (lo que representa unos 70 kilos menos para un macho adulto). Hembras más delgadas producen menos crías con una menor tasa de supervivencia, por lo que la población local de osos ha disminuido en un 22 por ciento desde 1987. Los hambrientos osos polares están invadiendo cada vez más las poblaciones del norte de Canadá y Alaska, donde con frecuencia se les recibe con disparos de escopeta. Los osos polares son ágiles nadadores; pero en los últimos tiempos se les ha visto nadar a unos 100 kilómetros de las costas, una distancia mucho mayor de la que acostumbraban, puesto que los témpanos de hielo se derriten. Se han encontrado varios osos muertos flotando después de una tormenta; se cree que se ahogaron al encontrarse demasiado lejos de la costa como para nadar hacia un lugar seguro.

El Refugio Nacional de la Vida Silvestre del Ártico es el lugar donde se encuentra el mayor número de guaridas de osos en Alaska. Durante el último otoño, los osos polares se congregaron a lo largo de la línea costera del refugio. Más osos se están congregando ahí conforme el hielo se retira de la línea costera. Sin embargo, en Estados Unidos hay una continua presión política para abrir el refugio y dar paso a la extracción de petróleo. Irónicamente, los osos polares están amenazados no sólo por el cambio climático, sino también por la extracción de petróleo para alimentar el voraz apetito del país por los combustibles fósiles, que contribuirán a incrementar aún más el calentamiento global.

FIGURA E28-2 Los osos polares sobre una delgada capa de hielo
La pérdida del hielo en la zona del ártico amenaza la supervivencia de los osos polares.

Con menos del 5 por ciento de la población mundial, Estados Unidos es responsable por aproximadamente el 25 por ciento de los gases de invernadero del mundo. Las emisiones totales de gases de invernadero de ese país alcanzan las 6 toneladas (5 toneladas métricas) de carbono por persona cada año, más que cualquier otro país del planeta.

¿Es posible que las acciones de un individuo hagan la diferencia? Jonathan Foley, de la Universidad de Wisconsin, así lo cree. Foley está a la vanguardia de la investigación sobre el clima y encabezó un equipo que desarrolló uno de los primeros modelos por computadora del cambio climático global para considerar las repercusiones de los sistemas biológicos y el uso que hacen de la tierra los humanos (como convertir bosques en tierras de cultivo) sobre el clima. En 1998 Jon y su esposa Andrea, al reconocer que las decisiones y elecciones individuales pueden tener un efecto significativo sobre las emisiones de gases de invernadero y el cambio climático resultante, tomaron una decisión: reducir el uso de energía de su familia y las emisiones de dióxido de carbono a la mitad. Los Foley y su pequeña hija vivían en una casa de cinco habitaciones a 48 kilómetros de sus centros de trabajo; Jon y Andrea utilizaban, cada uno, un automóvil para recorrer unos 96 kilómetros al día. Primero, se mudaron a una casa más pequeña pero mucho más cercana al trabajo. Un visitante a la nueva casa de los Foley —cálida y acogedora en invierno y fresca durante el verano— jamás se imaginaría cuán poca energía consume. Las grietas se sellaron y el ático se aisló. Cada aparato electrodoméstico se eligió en función de su eficiencia en el consumo de energía. Pequeñas bombillas fluorescentes, que consumen un 75 por ciento menos de energía que las incandescentes, brindan luz en toda la casa. Unos decorativos ventiladores que cuelgan de los techos reducen la necesidad de utilizar el aire acondicionado durante el verano. Unos colectores solares suministran unos dos tercios de las necesidades de calentar agua, mientras los vidrios de las ventanas de baja emisión permiten la entrada de la luz solar y reducen la pérdida de calor en invierno. Los Foley ahora utilizan bicicletas o toman el autobús para ir al trabajo, pero también disfrutan su automóvil híbrido Toyota Prius que consume gasolina y energía eléctrica, el cual rinde casi 80 kilómetros por galón en los trayectos dentro de la ciudad. ¿Habrán alcanzado su meta? En los dos años posteriores a su decisión, los Foley, quienes ahora tienen dos hijas, redujeron su consumo de energía aproximadamente en un 65 por ciento. Foley afirma:

> Reducir las emisiones de gases de invernadero no implica de ningún modo un "sacrificio". Redujimos nuestras emisiones en más del 50 por ciento, y ahora los recibos de consumo de energía eléctrica son menores, tenemos una casa más confortable, más tiempo para dedicar a nuestra familia y una mejor calidad de vida. Los estadounidenses pueden obtener mucho si reducen el consumo de combustibles fósiles: menores emisiones de gases de invernadero, mejor calidad del aire en nuestras ciudades, menos dependencia de las importaciones de petróleo, entre otras ventajas. Éste es un escenario de triunfo, así que, ¿por qué no empeñarse en conseguirlo?

Recientemente, programas innovadores por todo el mundo (como Carbonfund.org) están proponiendo otras formas de llevar a cabo ese "empeño" individual. Las iniciativas de *compensación del carbono* ayudan a la gente a realizar una compensación por el carbono que liberan invirtiendo en proyectos que alientan una mayor eficiencia en el consumo de energía, el uso de energía renovable y la reforestación. Por ejemplo, si tu auto tiene un rendimiento de 48 kilómetros por galón y manejas 19,000 kilómetros por año, tu auto liberará unas 3.5 toneladas de CO_2 (o una tonelada de carbono). Carbonfund.org te permite elegir proyectos donde la inversión reducirá las emisiones de CO_2 por alrededor de $5 por tonelada. Ésta y muchas otras iniciativas de compensación del carbono (véase la sección al respecto en http://www.ecobusinesslinks-.com) constituyen una excelente forma de mejorar las elecciones personales del estilo de vida y reducir sus efectos ulteriores. ¿Puedes hacer la diferencia? ¡La respuesta es un rotundo "Sí"!

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO EL REGRESO DEL SALMÓN

Los científicos que investigan el regreso del salmón rojo a las corrientes de Alaska son testigos de una maravillosa vista. Cientos de cuerpos de color rojo brillante se retuercen en el agua tan superficialmente que apenas si los cubre. Una hembra agita su cola, excavando una depresión poco profunda en la grava donde libera sus óvulos de color rojo coral; mientras tanto, un macho los baña con sus espermatozoides. Pero después de su larga y agotadora migración, estos salmones adultos mueren. Su carne es destrozada, sus músculos se degradan y el acto final de reproducción consume su último remanente de energía. Pronto, la corriente estará llena de cuerpos en agonía, muertos y en descomposición, lo que representa una abundancia de nutrimentos inimaginable en cualquier otra época del año. Las águilas, los osos pardos y las gaviotas se congregan para atiborrarse con la efímera recompensa. Las moscas se reproducen en los cadáveres, sirviendo de alimento a arañas, aves y truchas. Los ciclos de reproducción de las poblaciones locales de visones se han desarrollado en función del acontecimiento; las hembras lactan precisamente cuando los salmones les proveen abundante alimento. Los estudios de los isótopos revelan que más de una cuarta parte del nitrógeno que se incorpora a las hojas de los árboles y arbustos cercanos a estas corrientes proviene de los cuerpos de los salmones. Los investigadores estiman que 230 millones de kilogramos de salmón migran corriente arriba en el noroeste del Pacífico de Estados Unidos cada año, aportando cientos de miles de kilogramos de nitrógeno y fósforo tan sólo al río Columbia. Ahora, debido a factores que incluyen la pesca excesiva, la construcción de presas en los ríos, el desvío de las aguas para labores de irrigación, los escurrimientos de las actividades agrícolas y la contaminación de los estuarios (donde varias especies de salmón pasan buena parte de su ciclo de vida), las poblaciones migratorias de salmón en la región han disminuido en un 90 por ciento en relación con el siglo pasado. La red de vida que dependía del enorme flujo de nutrimentos que circulaba corriente arriba cada año se ha perturbado.

Piensa en esto Algunas poblaciones de salmón se han reducido tanto que ameritan protección de la Ley de Especies en Peligro de Extinción. Algunos argumentan que, puesto que el salmón también se cultiva con fines comerciales en estanques artificiales, no requiere de protección legal. Mientras tanto, los investigadores que estudian el salmón rey cultivado en estanques artificiales advirtieron una disminución del 25 por ciento en el tamaño promedio de los huevos de salmón en apenas cuatro generaciones. Estos huevos producen peces de menor tamaño. Con base en esta información, explica por qué los ecologistas y conservacionistas están solicitando que se proteja al salmón en estado silvestre.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

28.1 ¿Cuáles son las trayectorias de la energía y de los nutrimentos?

Los ecosistemas se sostienen gracias a un flujo continuo de energía de la luz solar y un reciclado constante de los nutrimentos.

Web tutorial 28.1 Flujo de energía y redes alimentarias

28.2 ¿Cómo fluye la energía a través de las comunidades?

La energía entra en la parte biótica de los ecosistemas cuando los autótrofos la aprovechan durante la fotosíntesis. La productividad primaria neta es la cantidad de energía que los autótrofos almacenan en una unidad de área específica a lo largo de un lapso determinado.

Los niveles tróficos describen las relaciones de alimentación de los ecosistemas. Los autótrofos son los productores y constituyen el nivel trófico inferior. Los herbívoros ocupan el segundo nivel como consumidores primarios. Los carnívoros se comportan como consumidores secundarios cuando se alimentan de herbívoros y como consumidores terciarios o de un nivel más alto cuando comen otros carnívoros. Los omnívoros, que consumen tanto plantas como otros animales, ocupan múltiples niveles tróficos.

Las relaciones de alimentación en las que cada nivel trófico está representado por un organismo se llaman *cadenas alimentarias.* En los ecosistemas naturales las relaciones de alimentación son mucho más complejas y se describen como redes alimentarias. Los comedores de detritos y los descomponedores, que digieren los cadáveres y los desechos, utilizan y liberan la energía almacenada en éstos y ponen en libertad nutrimentos que son aprovechados de nuevo. En general, sólo alrededor del 10 por ciento de la energía captada por los organismos de un nivel trófico se convierte en el cuerpo de los organismos del nivel inmediato superior. Cuanto más elevado es un nivel trófico, menos energía está disponible para su sostenimiento. En consecuencia, las plantas son más abundantes que los herbívoros y éstos son más comunes que los carnívoros. El almacenamiento de energía en cada nivel trófico se ilustra gráficamente en forma de una pirámide de energía. La pirámide de energía explica la amplificación biológica, que es el proceso por el que las sustancias tóxicas se acumulan en concentraciones cada vez mayores en los niveles tróficos progresivamente más altos.

28.3 ¿Cómo se desplazan los nutrimentos dentro de los ecosistemas y entre ellos?

El ciclo de un nutrimento representa el desplazamiento de la reserva de éste (que por lo regular se encuentra en la parte abiótica, esto es, inanimada, del ecosistema) a la parte biótica, o animada, del ecosistema y de regreso a la reserva, donde nuevamente queda a disposición de los productores. Las reservas de carbono comprenden los océanos, la atmósfera y los combustibles fósiles. El carbono entra en los productores por la vía de la fotosíntesis. A partir de los autótrofos, el carbono recorre la red alimentaria y es liberado en la atmósfera en forma de CO_2 durante la respiración celular.

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera. Las bacterias y las actividades industriales de los humanos convierten el nitrógeno gaseoso en amoniaco y nitrato, que las plantas pueden utilizar. El nitrógeno pasa de los productores a los consumidores y es devuelto al ambiente por medio de la excreción, gracias a las actividades de los comedores de detritos y los descomponedores.

La reserva de fósforo está en las rocas, en forma de fosfato, que se disuelve en el agua de lluvia. Los organismos fotosintéticos absorben el fosfato, que luego recorre las redes alimentarias. Parte del fosfato se excreta; los descomponedores devuelven el resto al suelo y al agua. Otra parte es arrastrada a los océanos, donde se deposita en los sedimentos marinos. Los seres humanos extraen las rocas ricas en fosfato para producir fertilizantes.

La reserva principal de agua son los océanos. La energía solar evapora el agua, que regresa a la superficie terrestre en forma de precipitación. El agua entra en los lagos y depósitos subterráneos y fluye por los ríos, que desembocan en los océanos. Las plantas y los animales absorben agua directamente; el agua también transita por las redes alimentarias. Una pequeña cantidad se combina con CO_2 durante la fotosíntesis para formar moléculas de alta energía.

Web tutorial 28.2 El ciclo del carbono y el calentamiento global

Web tutorial 28.3 El ciclo del nitrógeno

Web tutorial 28.4 El ciclo hidrológico

28.4 ¿A qué se debe la "lluvia ácida"?

Cuando las actividades humanas interfieren en el funcionamiento natural de los ecosistemas se generan problemas ambientales. Los procedimientos industriales emiten sustancias tóxicas y producen más nutrimentos de los que los ciclos de nutrimentos pueden procesar con eficiencia. En virtud del consumo masivo de combustibles fósiles, hemos sobresaturado los ciclos naturales del carbono, el azufre y el nitrógeno. La quema de combustibles fósiles libera dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. En la atmósfera, estas sustancias se convierten en ácido sulfúrico y ácido nítrico, que luego regresan a la Tierra en forma de sedimentación ácida, incluida la lluvia ácida. La acidificación de los ecosistemas de agua dulce ha reducido sustancialmente su capacidad de sostener la vida, en particular en la zona oriental de Estados Unidos. A grandes alturas, la sedimentación ácida provoca daños significativos en muchos bosques del este y amenaza otros por todo el territorio de ese país.

28.5 ¿Qué provoca el calentamiento global?

La quema de combustibles fósiles incrementa sustancialmente el dióxido de carbono (un gas de invernadero) en la atmósfera. Tal incremento se correlaciona con el aumento global de las temperaturas; casi todos los científicos especializados en el estudio de la atmósfera sostienen que el calentamiento global es resultado de las actividades industriales de los seres humanos. El calentamiento global provoca que los hielos de gran antigüedad se derritan; también influye en la distribución y las actividades estacionales de la vida silvestre. Los científicos creen que el calentamiento global está comenzando a tener un efecto importante sobre los patrones climáticos y de lluvia, con resultados impredecibles.

TÉRMINOS CLAVE

amplificación biológica *pág. 566*
autótrofo *pág. 561*
biodegradable *pág. 566*
biomasa *pág. 561*
cadena alimentaria *pág. 562*
calentamiento global *pág. 573*
carnívoro *pág. 562*
ciclo biogeoquímico *pág. 567*
ciclo hidrológico *pág. 570*
ciclos de nutrimentos *pág. 567*
combustible fósil *pág. 568*
comedores de detritos *pág. 564*
consumidor *pág. 561*
consumidor primario *pág. 562*
consumidor secundario *pág. 562*
consumidor terciario *pág. 562*
deforestación *pág. 573*
descomponedores *pág. 564*
efecto de invernadero *pág. 573*
gas de invernadero *pág. 573*
herbívoro *pág. 562*
heterótrofo *pág. 561*
nivel trófico *pág. 562*
omnívoro *pág. 564*
pirámide de energía *pág. 565*
productividad primaria neta *pág. 561*
productor *pág. 561*
red alimentaria *pág. 562*
reserva *pág. 567*
sedimentación ácida *pág. 571*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. ¿Por qué el flujo de energía en los ecosistemas es fundamentalmente diferente del flujo de nutrimentos?
2. ¿Qué es un organismo autótrofo? ¿Qué nivel trófico ocupa y cuál es su importancia en los ecosistemas?
3. Define el concepto de *productividad primaria.* Pronosticarías una mayor productividad ¿en un estanque de granja o en un lago alpino? Defiende tu respuesta.
4. Menciona los tres primeros niveles tróficos. Entre los consumidores, ¿cuáles son los más abundantes? ¿Por qué esperarías una mayor biomasa de plantas que de herbívoros en cualquier ecosistema? Relaciona tu respuesta con la "ley del 10 por ciento".
5. ¿Cuál es la diferencia entre las cadenas alimentarias y las redes alimentarias? ¿Cuál es la representación más exacta de las relaciones de alimentación efectivas en los ecosistemas?
6. Define a los *comedores de detritos* y a los *descomponedores*; explica su importancia en los ecosistemas.
7. Describe el desplazamiento del carbono de su reserva a la comunidad biótica y de vuelta a la reserva. ¿De qué modo han alterado las actividades humanas el ciclo del carbono y cuáles son sus implicaciones para el clima en el futuro?
8. Explica cómo pasa el nitrógeno del aire a una planta.
9. Describe la trayectoria de una molécula de fósforo de una roca rica en fosfato al DNA de un carnívoro. ¿Por qué el ciclo del fósforo es fundamentalmente distinto de los ciclos del carbono y del nitrógeno?
10. Describe el desplazamiento de una molécula de agua desde el momento en que abandona el océano hasta que llega una planta, para finalmente regresar al océano; describe todos los pasos y procesos intermedios.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Qué podría hacer tu escuela o universidad para reducir su contribución a la lluvia ácida y al calentamiento global? Sé específico en tu respuesta y, de ser posible, propón soluciones alternativas y funcionales a las prácticas vigentes.
2. Define y cita un ejemplo de *amplificación biológica.* ¿Qué características poseen los materiales que experimentan amplificación biológica? ¿En qué niveles tróficos son más graves los problemas? ¿Por qué?
3. Comenta la contribución del crecimiento demográfico a *a*) la lluvia ácida y *b*) el efecto de invernadero.
4. Describe lo que le ocurriría a una población de ciervos si se eliminaran todos los depredadores y se prohibiera la caza. Incluye los efectos en la vegetación, además de los efectos en la población misma de ciervos. Relaciona tu respuesta con la capacidad de carga, conforme a lo que se estudió en el capítulo 26.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Gorman, C. "Global Warming: How It Affects Your Health". *Time*, 3 de abril de 2006. La tendencia hacia el calentamiento global podría causar más muertes por los climas extremosos y la propagación de los mosquitos transmisores del paludismo.

Kluger, J. "The Turning Point". *Time*, 3 de abril de 2006. Los casquetes polares se derriten, las sequías se incrementan, la vida silvestre se desvanece y los efectos del calentamiento global podrían crear ciclos de retroalimentación positiva que agraven aún más el problema.

Krajick, K. "Long-Term Data Show Lingering Effects from Acid Rain". *Science*, 13 de abril de 2001. Los efectos nocivos de la lluvia ácida persisten, mientras que los niveles de control son inadecuados para restablecer la salud del ecosistema.

Milius, S. "Decades of Dinner". *Science News*, 7 de mayo de 2005. El cuerpo de una ballena en el lecho marino constituye la base para una comunidad subacuática.

Moore, K. D. y Moore, J. W. "The Gift of Salmon". *Discover*, mayo de 2003. Los salmones que migran corriente arriba, para desovar y luego morir, invierten la trayectoria habitual de los nutrimentos y ayudan a reabastecer aquellos que transitan corriente abajo durante el resto del año.

Pearce, F. "The Parched Planet". *New Scientist*, febrero de 2006. La sequía combinada con la extracción no sustentable de las aguas subterráneas amenaza la producción de alimentos, particularmente en los países en desarrollo.

Walsh, B. "The Impacts of Asia's Giants". *Time*, 3 de abril de 2006. El desarrollo de India y China tendrá profundas repercusiones en el futuro del planeta.

Wright, K. "Our Preferred Poison". *Discover*, marzo de 2005. El mercurio bioacumulado amenaza a los animales en los niveles tróficos superiores, incluidos los seres humanos.

CAPÍTULO 29

Los diversos ecosistemas de la Tierra

Kahindi Samson atrapa una mariposa. Imágenes en recuadro: **(arriba)** Mariposa pensamiento de color azul marino. **(abajo)** Identificación y clasificación de pupas para su envío.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Alas de esperanza

29.1 ¿Qué factores influyen en el clima de la Tierra?

El Sol es el motor del clima y del estado del tiempo

Muchos factores físicos también influyen en el clima

29.2 ¿Qué condiciones son necesarias para la vida?

29.3 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio terrestre?

Guardián de la Tierra: El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector

Los biomas terrestres sostienen comunidades vegetales características

Enlaces con la vida: ¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales?

La precipitación pluvial y la temperatura determinan la vegetación que un bioma es capaz de sostener

29.4 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio acuático?

Los ecosistemas de agua dulce incluyen lagos, corrientes y ríos

Los ecosistemas marinos cubren gran parte de la Tierra

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Alas de esperanza

ESTUDIO DE CASO ALAS DE ESPERANZA

PARA CONTRIBUIR AL SOSTENIMIENTO Y LA ALIMENTACIÓN de sus cinco hermanos y hermanas menores, Kahindi Samson, a los 12 años, comenzó a internarse a escondidas en la selva de Arabuko-Sokoke. Kahindi cazaba antílopes en peligro de extinción y derribaba viejos árboles que servían de hogar al autillo de Sokoke. Esta preciosa selva keniana está protegida por el gobierno al ser el remanente más grande de la selva costera de África oriental y refugio final de aves y mamíferos en peligro de extinción, que han sido desplazados por el crecimiento de la población humana. Sin embargo, para los agricultores de las tierras circundantes, la selva era el enemigo, hogar de elefantes y babuinos que salían de noche a comerse sus cultivos. Casi todos deseaban que se talara la selva.

Ian Gordon, un ecologista especializado en mariposas, contemplaba con alarma la cacería furtiva y la tala de árboles; la selva de Arabuko-Sokoke es el hogar de 250 especies de mariposas. Incapaz de mantenerse al margen sin poder hacer nada, Gordon fundó el Proyecto Kipepeo, que significa "mariposa" en el idioma suajili. Su misión era convencer a los escépticos agricultores locales de cultivar mariposas en vez de plantas. Actualmente, Kahindi entra en la selva con un permiso y una red para mariposas; después, pone las mariposas hembra preñadas que atrapó en una jaula afuera de su casa. Una vez que los huevecillos eclosionan, Kahindi engorda las orugas con hojas que recolecta en la selva. Antes de un mes, las orugas están listas para formar pupas y ser enviadas a Estados Unidos y Europa, donde eclosionarán en medio de la exuberante vegetación tropical de los jardines de mariposas, para deleite de los visitantes que nunca habían contemplado el esplendor de las mariposas de la selva tropical. Kahindi es uno de los 650 trabajadores locales de mariposas que ahora dependen de la selva de Arabuko-Sokoke para ganarse la vida y que viven mucho mejor que antes. "Antes queríamos que la selva desapareciera", dice la cultivadora de mariposas Priscilla Kiti, "pero ahora nos ganamos la vida principalmente cultivando mariposas, así que, si talan los árboles, las cosas se van a poner muy difíciles".

29.1 ¿QUÉ FACTORES INFLUYEN EN EL CLIMA DE LA TIERRA?

En la distribución de la vida, especialmente la terrestre, influyen en altísimo grado tanto el estado del tiempo como el clima. El **estado del tiempo**, o tiempo meteorológico, se refiere a las fluctuaciones de corto plazo de la temperatura, la humedad, la nubosidad, el viento y la precipitación en una región durante periodos de horas o días. El **clima**, en cambio, se refiere a los regímenes de tiempo meteorológico que prevalecen año con año, o incluso de un siglo a otro, en una región determinada. El intervalo de temperaturas y la cantidad de luz solar y de agua determinan el clima de una región dada. En tanto que el estado del tiempo afecta a los organismos individuales, el clima influye en la distribución general de toda la especie y la limita.

El Sol es el motor del clima y del estado del tiempo

Un gran motor termonuclear, el Sol, rige tanto el clima como el estado del tiempo. La energía solar llega a la Tierra en forma de radiación de muy diversas longitudes de onda; el espectro abarca los rayos ultravioleta (UV) de alta energía y longitud de onda corta, la luz visible y las largas longitudes de onda infrarrojas que producen calor. La energía solar que llega a la Tierra impulsa el viento, las corrientes oceánicas y el ciclo hidrológico global. No obstante, antes de alcanzar la superficie terrestre, la luz solar sufre modificaciones por parte de la atmósfera. Existe una capa relativamente rica en ozono (O_3) en la atmósfera media. Esta *capa de ozono* absorbe buena parte de la radiación UV de alta energía proveniente del Sol, la cual daña las moléculas biológicas (véase la sección "Guardián de la Tierra: El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector"). El polvo, el vapor de agua y las nubes dispersan la luz y reflejan parte de la energía hacia el espacio. El dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano y otros *gases de invernadero* absorben de forma selectiva la energía de longitudes de onda infrarrojas y atrapan el calor en la atmósfera. Las actividades humanas han elevado los niveles de gases de invernadero, como se describió en el capítulo 28.

Sólo alrededor de la mitad de la energía solar que llega a la atmósfera incide efectivamente en la superficie terrestre. De esa cantidad, una pequeña fracción se refleja de inmediato hacia el espacio; las plantas y los microorganismos fotosintéticos captan otra fracción de poca magnitud y la utilizan para realizar la fotosíntesis; el resto se absorbe en forma de calor. Tarde o temprano, casi toda la energía solar que llega vuelve al espacio, ya sea en forma de luz o de radiación infrarroja (calor). La energía solar, almacenada temporalmente en forma de calor por la atmósfera y la superficie terrestre, mantiene la relativa calidez de nuestro planeta.

Muchos factores físicos también influyen en el clima

Numerosos factores físicos influyen en el clima. Entre los más importantes están la curvatura de la Tierra y su eje inclinado conforme gira alrededor del Sol. Estos factores provocan un calentamiento desigual de la superficie y los cambios de estaciones de acuerdo con la dirección de la luz solar al norte y sur del ecuador. El calentamiento desigual, aunado al movimiento de rotación de la Tierra, genera corrientes de aire y de los océanos, las cuales, a la vez, se ven modificadas por las masas de tierra con formas irregulares.

La curvatura de la Tierra y su inclinación influyen en el ángulo en el que incide la luz solar

La cantidad de luz solar que incide sobre una zona determinada de la Tierra tiene un efecto importante sobre las temperaturas anuales promedio. En el ecuador, la luz solar incide sobre la superficie terrestre casi en ángulo recto, haciendo que el estado del tiempo sea cálido casi siempre. Más al norte o más al sur, los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre con una mayor inclinación. Este ángulo dispersa la misma cantidad de luz solar sobre una zona de mayor tamaño, produciendo, en general, temperaturas más bajas (**FIGURA 29-1**).

La *latitud*, expresada en grados, es una medida de la distancia al norte o al sur del ecuador. Este último se localiza a una latitud de 0°, mientras que los polos están a 90° de latitud norte y sur. Como la Tierra está inclinada sobre su eje de rotación

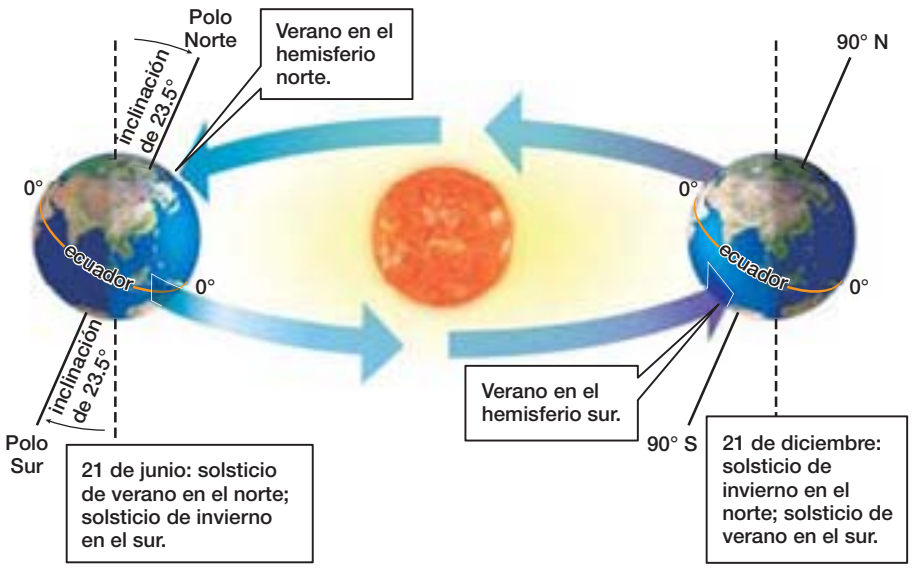


FIGURA 29-1 La curvatura y la inclinación de la Tierra generan las estaciones y el clima
Las temperaturas más altas y más uniformes se registran en el ecuador, mientras que las más bajas y variables se registran en los polos. La luz solar incide casi perpendicularmente a la superficie terrestre en el ecuador durante todo el año, en tanto que la luz que incide sobre los polos varía en las distintas estaciones y su ángulo la distribuye sobre un zona mucho más grande. La inclinación de la Tierra sobre su eje provoca variaciones estacionales de la dirección de incidencia de la luz. PREGUNTA: Describe cómo serían las estaciones y la duración del día si el eje de rotación de la Tierra no estuviera inclinado. ¿Seguiría existiendo un gradiente de temperatura del ecuador a los polos?

mientras efectúa su recorrido anual alrededor del Sol, las latitudes más altas experimentan a lo largo del año considerables variaciones en cuanto al ángulo en el que incide la luz solar, lo que da origen a estaciones muy pronunciadas. Por ejemplo, cuando el hemisferio norte está inclinado hacia el Sol, recibe la luz solar más directamente y experimenta el verano; cuando en ese hemisferio es invierno, el hemisferio sur alcanza su mayor acercamiento al Sol (véase la figura 29-1). A lo largo del año, la luz solar continúa incidiendo en el ecuador directamente, por lo que esta región permanece cálida y experimenta una escasa variación durante las estaciones del año.

Las corrientes de aire crean extensas regiones climáticas

La rotación de la Tierra, junto con las diferencias de temperatura entre las masas de aire, genera las corrientes eólicas. Puesto que el aire caliente es menos denso que el aire frío, cuando los rayos solares directos inciden en el ecuador, el aire caliente se eleva en esa región. El aire caliente cercano al ecuador también está cargado de agua que el calor del Sol ha evaporado (**FIGURA 29-2a**). Al elevarse el aire saturado de vapor, se enfría un poco. El aire frío no retiene tanta humedad como el aire caliente y, por esa razón, se condensa agua del aire que sube y se precipita en forma de lluvia. Los rayos directos del Sol y la precipitación pluvial que se registra cuando el aire caliente y húmedo se eleva y se enfría crean una banda en torno al ecuador que se conoce como el *trópico.* Esta región es la más calurosa y húmeda de la Tierra. El aire seco y ahora más frío fluye entonces hacia el norte y el sur desde el ecuador. Cerca de los 30° N y los 30° S, el aire se ha enfriado lo suficiente para descender. Conforme este aire baja, el calor irradiado por la Tierra lo calienta y, para cuando alcanza la superficie, ya está caliente y muy seco. No debe sorprendernos, por lo tanto, el hecho de que los principales desiertos del mundo se encuentren en esas latitudes (figura 29-2a, b). Este aire fluye entonces de nuevo hacia el ecuador. Más al norte y al sur, este régimen de circulación general se repite, depositando humedad alrededor de los 60° N y 60° S y creando condiciones extremadamente secas en los polos Norte y Sur.

Observa en la figura 29-2a que las corrientes de aire aparecen desviadas hacia la derecha (en relación con la dirección de su recorrido) en el hemisferio norte, y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Esto se debe a que la Tierra gira de este a oeste debajo de las masas de aire. El movimiento de la superficie terrestre en relación con la atmósfera provoca que los observadores localizados en la Tierra —y los ecosistemas— experimenten vientos predominantes cuya dirección depende del régimen de circulación del aire encima de ellos. En Estados Unidos prevalecen los *vientos del oeste* (figura 29-2a; que provienen generalmente del sur y se desvían hacia la derecha), mientras que en México prevalecen los *vientos alisios del noreste* (figura 29-2a; que provienen del norte y se desvían hacia la derecha). Esta desviación de los vientos es un ejemplo del *efecto Coriolis*, que se refiere a los efectos de la rotación de la Tierra sobre las grandes masas de aire y agua que fluyen libremente en relación con la superficie terrestre.

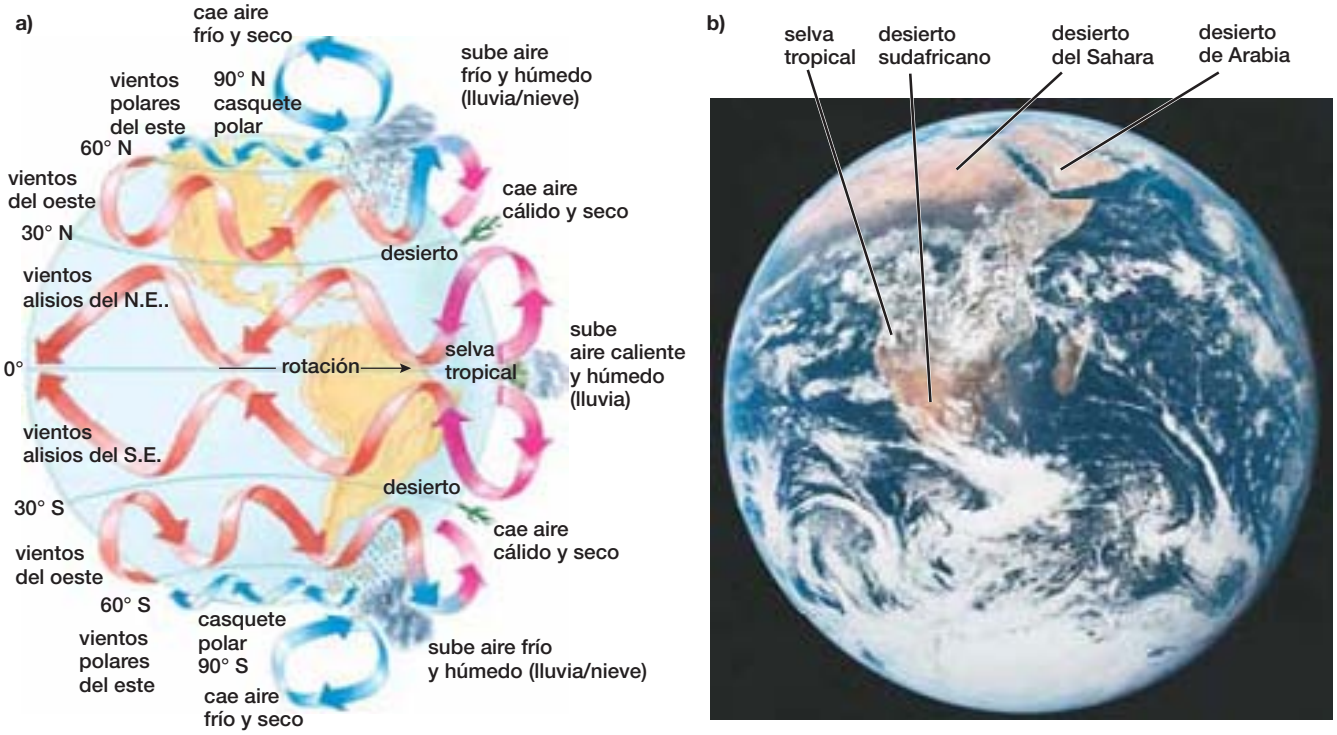


FIGURA 29-2 Distribución de las corrientes de aire y de las regiones climáticas
a) La precipitación pluvial está determinada principalmente por la distribución de las temperaturas y la rotación de la Tierra. La influencia recíproca de estos dos factores crea corrientes de aire que suben y bajan de forma predecible según la latitud, y producen extensas regiones climáticas. ***b)*** Algunas de estas regiones son visibles en esta fotografía del Continente Africano tomada desde el *Apolo 11*. A lo largo del ecuador hay espesas nubes que depositan humedad sobre las selvas tropicales de África central. Advierte la ausencia de nubes sobre los desiertos del Sahara y de Arabia cerca de los 30° N y sobre el desierto sudafricano cerca de los 30° S.

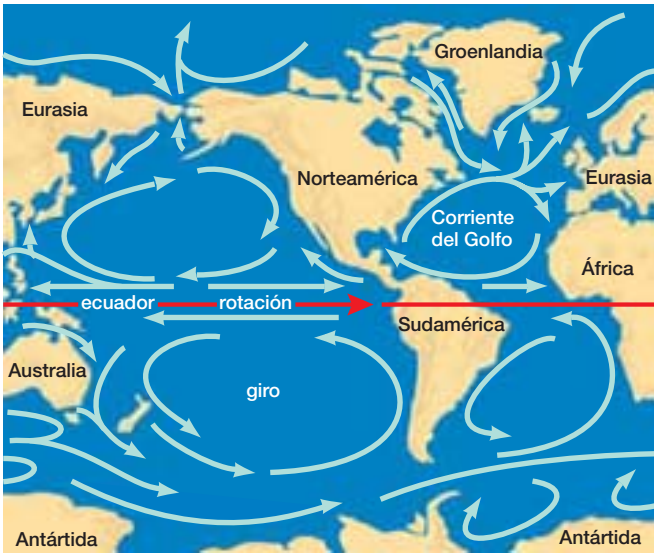


FIGURA 29-3 Las trayectorias de circulación de los océanos se llaman giros
Los giros se mueven en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur. Estas corrientes tienden a distribuir el calor del ecuador a las zonas costeras septentrionales y meridionales.

Las corrientes oceánicas moderan los climas costeros

Las corrientes oceánicas deben su impulso a la rotación de la Tierra, a los vientos y al calentamiento directo del agua por el Sol. Los continentes interrumpen las corrientes y las descomponen en trayectorias aproximadamente circulares llamadas **giros**. El efecto Coriolis provoca que los giros se muevan en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur (**FIGURA 29-3**). Como el agua se calienta y se enfría más lentamente que la tierra o el aire, las corrientes oceánicas tienden a moderar los extremos de temperatura. Por consiguiente, las regiones costeras tienen en general climas menos variables que las regiones próximas al centro de los continentes. Por ejemplo, el giro del Golfo —parte del giro del Océano Atlántico (figura 29-3)— lleva agua caliente de las regiones ecuatoriales hacia el norte, a lo largo de la costa oriental de Norteamérica, y crea así un clima más cálido y húmedo que el del interior del continente. Después, esta corriente lleva el agua aún cálida a regiones situadas todavía más al norte y al oriente, y calienta así la costa occidental de Europa antes de regresar al sur.

Los continentes y las montañas complican el estado del tiempo y el clima

Si la superficie terrestre fuera uniforme, las zonas climáticas formarían bandas de acuerdo con la latitud (véase la figura 29-2a). La presencia de continentes de forma irregular (que se calientan y se enfrían con relativa rapidez) en medio de los océanos (que se calientan y se enfrían con más lentitud) altera el flujo del viento y del agua y contribuye a la irregular distribución de los ecosistemas.

Las variaciones de altitud dentro de los continentes complican aún más la situación. Conforme aumenta la altitud, la atmósfera se enrarece y retiene menos calor. La temperatura desciende aproximadamente 2°C por cada 305 metros de altitud adicional. Esta característica explica por qué hay montañas cubiertas de nieve incluso en el trópico (**FIGURA 29-4**). También las montañas modifican los regímenes pluviales. Cuando el aire cargado de humedad se ve obligado a subir al toparse con una montaña, se enfría. El enfriamiento reduce la capacidad del aire para retener humedad, y ésta se condensa en forma de lluvia o nieve sobre la ladera de la montaña que da hacia el viento (la más próxima). El aire frío y seco se calienta de nuevo al bajar por la otra ladera de la montaña y absorbe agua de la tierra, con lo cual crea una zona seca local conocida como **sombra orográfica**. Por ejemplo, las cordilleras del oeste de Estados Unidos, como la Sierra Nevada, exprimen la humedad de los vientos del oeste que llegan del Océano Pacífico y crean desiertos en la sombra orográfica de sus laderas orientales (**FIGURA 29-5**).

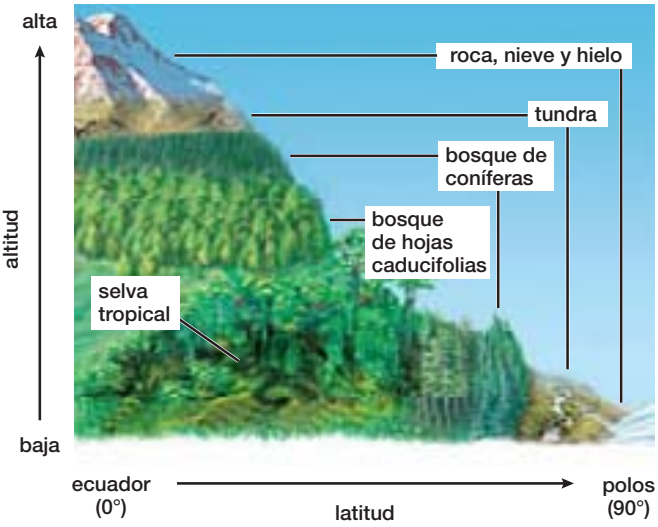


FIGURA 29-4 Efectos de la altitud sobre la temperatura
En términos de temperatura, ascender una montaña en el hemisferio norte es en cierta forma como viajar hacia el norte; en ambos casos, las temperaturas cada vez más bajas producen biomas similares.

El Niño interrumpe periódicamente las interacciones entre el océano y la atmósfera

La zona tropical occidental del Océano Pacífico generalmente alberga una enorme reserva de agua cálida que es empujada hacia el oeste por los vientos alisios del noreste (véase la figura 29-2a). La evaporación del agua de esta masa cálida se precipita en forma de lluvia sobre los países a orillas del Pacífico occidental, como Indonesia y Australia. Para remplazar el agua que se desplaza hacia el oeste, agua más fría de las profundidades oceánicas, rica en nutrimentos, sube a lo largo de la costa occidental de Sudamérica, llevando a Perú una rica provisión de peces. Pero por razones desconocidas, a intervalos de entre 3 y 7 años, los vientos alisios se extinguen y el fenómeno conocido como **El Niño** se presenta. Llamado así por los pescadores peruanos en referencia al niño Jesús, El Niño trae consigo lluvias a Perú durante el mes de diciembre, normalmente árido, y los vientos alisios en extinción permiten que el agua cálida se disperse de regreso hacia el este a través del Pacífico hasta llegar a la costa occidental de Sudamérica. Mientras tanto, la sequía azota a Indonesia, el este de Australia y el sur de África. El Niño alteró con inmensa fuerza el es-

Los vientos dominantes transportan el agua desde el océano.
El agua es liberada conforme el aire sube y se enfría.
El aire seco baja, se calienta y absorbe agua de la tierra.
clima seco en la sombra orográfica
clima húmedo

FIGURA 29-5 Las montañas forman sombras orográficas

tado del tiempo en todo el mundo durante 1997 y 1998, provocando desastrosas inundaciones tanto en Perú como en el este de África, y sequías e incendios en Indonesia. En Estados Unidos, Texas se vio en medio de un calor fulminante y sequía, mientras que Florida sufrió inundaciones. Conforme los regímenes del estado del tiempo regresan a la normalidad después del paso de El Niño, la interacción entre el océano y la atmósfera podría ir más allá invirtiendo el régimen y provocando el fenómeno de **La Niña**. Los investigadores están trabajando para crear modelos de computadora que les permitan predecir estos eventos y sus efectos en el mundo mucho antes de que ocurran, una tarea bastante complicada. Mientras tanto, los científicos analizan las repercusiones del calentamiento global; algunos pronostican que en el futuro el fenómeno de El Niño se presentará con mayor frecuencia y severidad.

29.2 ¿QUÉ CONDICIONES SON NECESARIAS PARA LA VIDA?

Desde los líquenes que crecen en la roca desnuda hasta las algas termófilas ("que aman el calor", en griego) de los manantiales calientes del Parque Nacional Yellowstone y las bacterias que proliferan en condiciones similares a las de una olla de presión en las chimeneas hidrotermales de las profundidades marinas, la Tierra hierve de vida. Detrás de esta gran diversidad de hábitat está la capacidad común de proveer, en diversos grados, los cuatro recursos fundamentales que la vida exige y que son los siguientes:

- Nutrimentos para formar tejidos vivos
- Energía para impulsar las actividades metabólicas
- Agua líquida como medio para las reacciones metabólicas
- Temperaturas idóneas para la realización de estos procesos

Como veremos en las secciones siguientes, la distribución de estos recursos es muy desigual en la superficie terrestre. Su disponibilidad limita los tipos de organismos que pueden existir dentro de los diversos ecosistemas terrestres y acuáticos del planeta.

Los ecosistemas son extraordinariamente variados; sin embargo, existen modalidades bien definidas. La comunidad característica de cada ecosistema está dominada por organismos adaptados especialmente a condiciones ambientales particulares. Las variaciones en la temperatura y disponibilidad de luz, agua y nutrimentos moldean las adaptaciones de los organismos que habitan un ecosistema. La comunidad del desierto, por ejemplo, está dominada por plantas adaptadas al calor y la sequía. Los cactus del desierto de Mojave del suroeste de Estados Unidos son notablemente similares a las euforbiáceas de los desiertos de África y de las islas Canarias, aunque estas plantas sólo poseen un parentesco genético distante. Sus hojas con apariencia de espinas y sus tallos gruesos que almacenan agua son adaptaciones para climas secos (FIGURA 29-6). De modo análogo, las plantas de la tundra ártica y las de la tundra alpina en lo alto de las montañas presentan modalidades de crecimiento que reconocemos, sin lugar a dudas, como adaptaciones a un clima frío, seco y ventoso.

29.3 ¿CÓMO SE DISTRIBUYE LA VIDA EN EL MEDIO TERRESTRE?

La distribución de los organismos terrestres está limitada en buena parte por la disponibilidad de agua y por la temperatura. Los ecosistemas terrestres reciben luz en abundancia,

FIGURA 29-6 Las exigencias ambientales moldean las características físicas

La evolución, en respuesta a ambientes similares, ha moldeado el cuerpo de ***a)*** las cactáceas americanas y ***b)*** las euforbiáceas de las islas Canarias hasta impartirles formas casi idénticas, aunque pertenecen a familias diferentes. PREGUNTA: Describe las presiones de selección similares que operan en estas dos diferentes familias de plantas.

GUARDIÁN DE LA TIERRA

El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector

BIOÉTICA

Una pequeña fracción de la energía radiante que el Sol produce, llamada radiación *ultravioleta* (UV), tiene un nivel tan alto de energía que daña las moléculas biológicas. En pequeñas cantidades, la radiación UV ayuda a que la piel humana produzca vitamina D e induce el bronceado en las personas de piel clara. Sin embargo, en dosis mayores, la radiación UV causa quemaduras y envejecimiento prematuro de la piel, cáncer cutáneo y cataratas, un padecimiento en el que el cristalino del ojo se enturbia.

Por fortuna, el ozono de la estratosfera, una capa de la atmósfera que se extiende de los 10 a los 50 kilómetros por encima de la Tierra, elimina por filtración la mayor parte de la radiación UV. En estado puro, el *ozono* (O_3) es un gas explosivo y sumamente tóxico. En la estratosfera la concentración normal de ozono es de alrededor de 0.1 partes por millón (ppm), en comparación con 0.02 ppm en la parte baja de la atmósfera. Esta capa rica en ozono se conoce como la **capa de ozono**. La luz ultravioleta que incide en el ozono y el oxígeno provoca reacciones que descomponen y también regeneran el ozono. Al mismo tiempo, la radiación UV se transforma en calor y el nivel general de ozono permanece razonablemente constante; al menos así sucedía hasta antes de que los seres humanos interviniéramos.

En 1985 unos científicos británicos que estudiaban la atmósfera publicaron un descubrimiento sorprendente. Los niveles primaverales del ozono de la estratosfera sobre la Antártida habían descendido en más del 40 por ciento desde 1977. En el *agujero de ozono* sobre la Antártida, el ozono llega ahora a un tercio de los niveles que tenía antes que se iniciara el agotamiento (**FIGURA E29-1**). Aunque la gravedad del agotamiento de la capa de ozono es máxima sobre la Antártida, la capa de ozono se ha reducido en alguna medida sobre la mayor parte del mundo, incluso sobre prácticamente la totalidad de la zona continental de Estados Unidos. Los datos registrados por satélites indican que, desde principios de la década de 1970, la radiación UV ha aumentado en casi un 7 por ciento por década en el hemisferio norte y casi un 10 por ciento por década en el hemisferio sur. Los estudios epidemiológicos indican que por cada 1 por ciento de incremento en el tiempo de exposición a la radiación UV a lo largo de la vida, el riesgo de contraer cáncer de piel también se incrementa en 1 por ciento. Pero los efectos sobre la salud humana son sólo uno de los motivos de preocupación. La fotosíntesis que realiza el fitoplancton, constituido por los organismos productores en los ecosistemas marinos, se reduce bajo el agujero de ozono sobre la Antártida. Algunos tipos de árboles y cultivos agrícolas también resultan dañados por el incremento en la radiación UV.

La disminución del espesor de la capa de ozono se debe a los crecientes niveles de clorofluorocarbonos (CFC). Desarrollados en 1928, estos gases se usaban con frecuencia como fluidos de enfriamiento en refrigeradores y acondicionadores de aire, como propelentes en los rociadores de aerosol, en la producción de espuma plástica y como limpiadores de piezas electrónicas. Estos productos químicos son muy estables y se consideraba que no eran peligrosos. Su estabilidad, sin embargo, resultó ser un problema muy grave, pues permanecen sin sufrir cambios químicos conforme suben poco a poco hasta la estratosfera. Una vez ahí, y por el intenso bombardeo de luz UV, los CFC se degradan y liberan átomos de cloro. El cloro cataliza la descomposición del ozono en oxígeno gaseoso (O_2) sin sufrir cambios él mismo. Las nubes sobre las regiones ártica y antártica se componen de partículas de hielo que conforman una superficie donde la reacción se lleva a cabo.

Por fortuna, hemos dado los primeros pasos encaminados a "tapar" el agujero de ozono. En una serie de tratados de cooperación que se iniciaron en 1987, los países industrializados acordaron descontinuar de forma gradual, aunque rápidamente, el uso de los productos químicos que agotan el ozono, con miras a eliminar los CFC por completo para 1996. Los niveles globales de cloro atmosférico en el nivel del suelo (un indicador del uso de CFC) alcanzaron un máximo en 1994, y para 1999 los científicos detectaron reducciones de cloro también en la estratosfera. En 2005 la Asociación Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos reportó que las concentraciones de ozono se habían estabilizado entre 1996 y 2002. Pero como estos compuestos persisten entre 50 y 100 años y tardan una década o más en ascender a la estratosfera, la emisión actual de CFC por parte de los países en desarrollo —aunada a los millones de toneladas que ya han sido liberadas en los países industrializados— significa que una recuperación significativa podría tardar 40 años. En un espíritu de continua cooperación, los países desarrollados se comprometieron recientemente a ayudar a los países en desarrollo a diseñar alternativas a los CFC. Por su parte, China se comprometió a dejar de producir CFC en 2007.

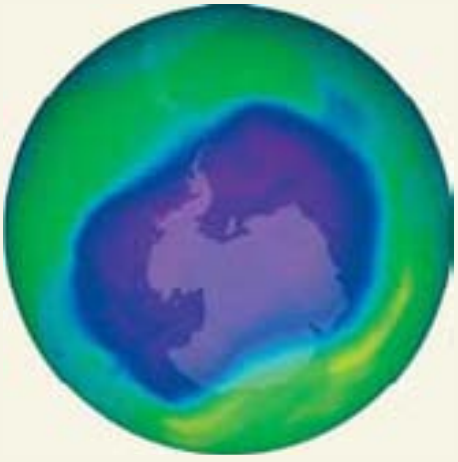


FIGURA E29-1 Imagen del agujero de ozono antártico obtenida desde un satélite
En esta imagen obtenida por un satélite de la NASA se observa el agujero de ozono en septiembre de 2006, resaltado en azul y púrpura. Con una dimensión de 29.5 millones de kilómetros cuadrados, rebasó ya el anterior récord, establecido en 2000. (*Imagen cortesía de la NASA*).

incluso en los días nublados, y el suelo aporta nutrimentos en gran cantidad. El agua, sin embargo, es limitada y se encuentra distribuida de modo muy desigual, tanto en términos de lugar como de tiempo. Los organismos terrestres deben estar adaptados para obtener agua cuando se halla disponible y para conservarla cuando escasea.

Al igual que sucede con el agua, las temperaturas favorables para la vida tienen una distribución muy desigual en

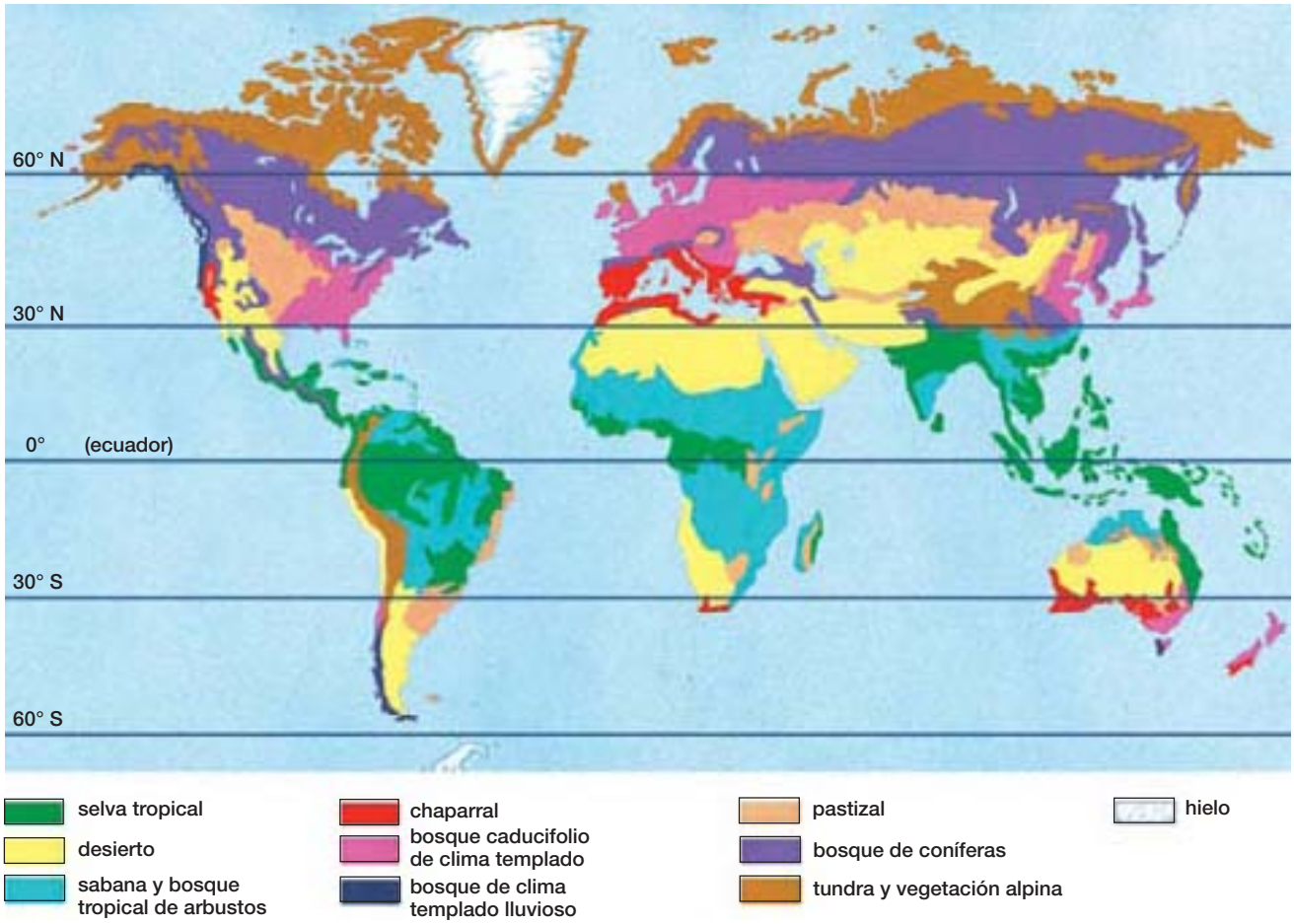


FIGURA 29-7 Distribución de los biomas
Aunque las cordilleras y el tamaño mismo de los continentes complican la distribución de los biomas, se advierten coincidencias de carácter general. Las tundras y los bosques de coníferas están en las partes más septentrionales del hemisferio norte, en tanto que los desiertos de México, del Sahara, de Arabia Saudita, de Sudáfrica y de Australia están situados aproximadamente entre los 20 y los 30° N y S.

cuanto a lugar y tiempo. En el Polo Sur, incluso en verano, la temperatura promedio está muy por debajo del punto de congelación; como es de esperar, la vida escasea en esa región. Lugares como la región central de Alaska tienen temperaturas favorables para el crecimiento de vegetación sólo durante el verano; en cambio, el trópico tiene un clima uniformemente caluroso y húmedo, por lo que la vida abunda en él.

Los biomas terrestres sostienen comunidades vegetales características

Las comunidades terrestres están dominadas y definidas por su vida vegetal. Puesto que las plantas no pueden escapar de la sequía, de los efectos de la luz solar o del clima invernal, tienden a estar adaptadas con precisión al clima de una región específica. Las grandes extensiones de tierra con condiciones ambientales similares y comunidades vegetales características reciben el nombre de **biomas** (FIGURA 29-7). En general, el nombre de cada bioma corresponde al tipo principal de vegetación que se encuentra en él. La vegetación predominante de cada bioma está determinada por la compleja interacción de la precipitación pluvial y la temperatura (FIGURA 29-8 poración a través de sus hojas. Además de la precipitación pluvial total y la temperatura, la forma como varían estos factores en función de las estaciones determina qué plantas pueden crecer en una región. Las plantas de la tundra ártica, por ejemplo, deben estar adaptadas a las condiciones pantanosas de principios del verano, pero también a las condiciones frías y extremadamente secas de buena parte del resto del año, cuando el agua se encuentra congelada y no está disponible. En los siguientes apartados analizaremos los principales biomas, comenzando en el ecuador y avanzando hacia los polos. También comentaremos algunos de los efectos de las actividades humanas en estos biomas. Aprenderás más acerca de las repercusiones de las actividades de los seres humanos sobre el planeta en el capítulo 30.

Selvas tropicales

Cerca del ecuador, la temperatura promedia entre 25 y 30°C, con pocas variaciones, y la precipitación pluvial fluctúa entre 2500 y 4000 mm anuales. Estas condiciones de calor y humedad uniformes se combinan para crear el bioma más variado de la Tierra, la **selva tropical**, dominada por enormes árboles de hojas anchas y perennes (FIGURA 29-9

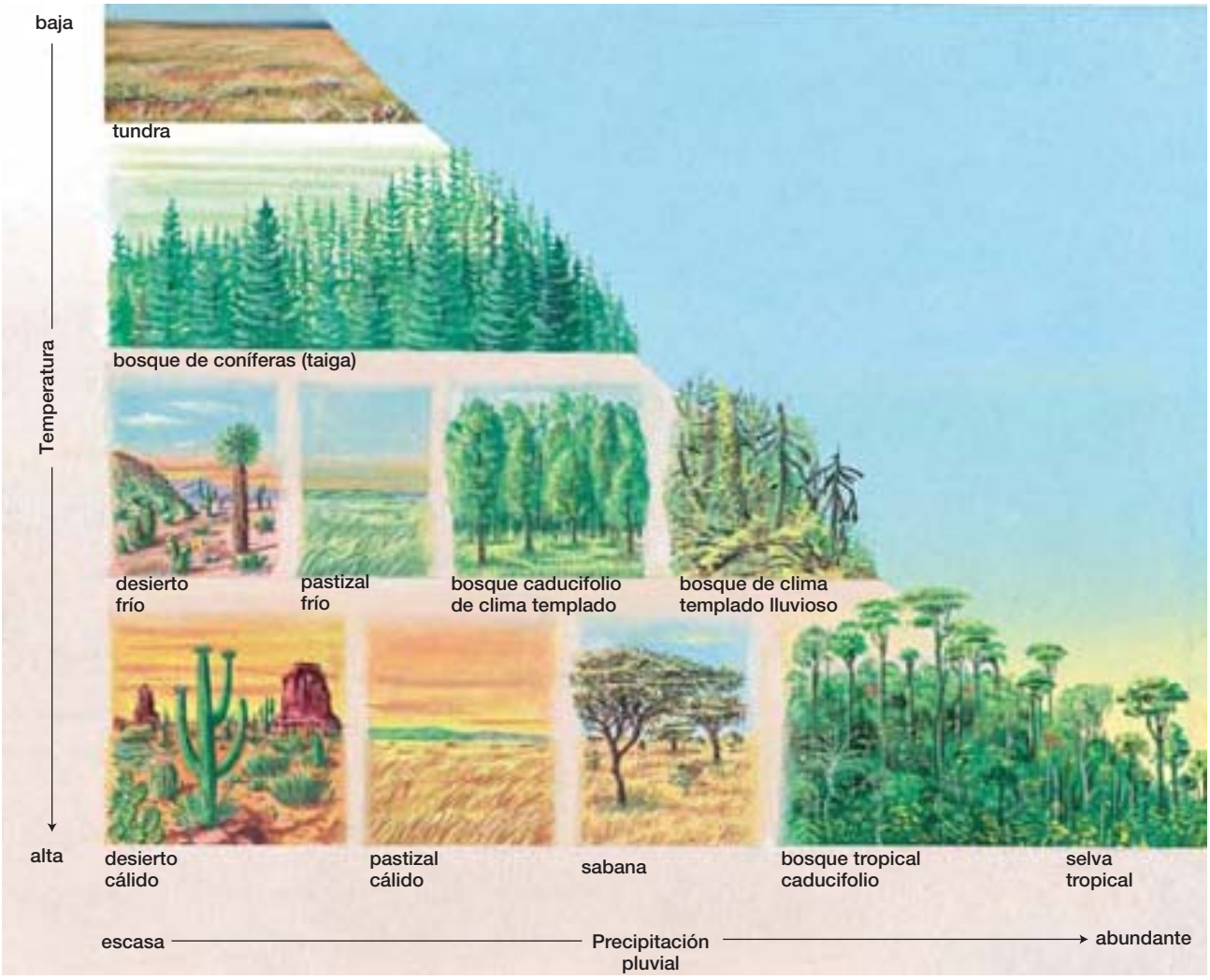


FIGURA 29-8 Influencia de la precipitación pluvial y la temperatura en la distribución de los biomas
En conjunto, estos dos factores determinan la disponibilidad de humedad del suelo, necesaria para el crecimiento de las plantas.

El término **biodiversidad**

FIGURA 29-9 Bioma de selva tropical
a) Los altísimos árboles envueltos en enredaderas buscan la luz en la densa selva tropical. Entre sus ramas habita la colección más variada de animales de la Tierra, entre ellos ***b)*** un tucán que se alimenta de frutos, ***c)*** una rana foliar de ojos dorados, ***d)*** una orquídea trepadora de árboles y ***e)*** un mono aullador. PREGUNTA: ¿Cómo es posible que un bioma con un suelo tan deficiente albergue la mayor productividad vegetal y la mayor diversidad animal sobre la Tierra?

gaban en cuestión de minutos tan pronto como un trozo de excremento tocaba el suelo!

Casi en el instante en que las bacterias o los hongos liberan nutrimentos de plantas o animales muertos en el suelo, los árboles y las enredaderas de la selva tropical absorben tales nutrimentos. Prácticamente todos los nutrimentos de una selva tropical son acaparados por la vegetación, por lo que el suelo es relativamente infértil y delgado.

Efectos de las actividades humanas

nutrimentos se liberan al suelo quemando la vegetación natural, las abundantes lluvias durante todo el año rápidamente los disuelven y los arrastran, dejando el suelo estéril al cabo de unas cuantas temporadas de cultivo. El suelo expuesto, rico en hierro y aluminio, se vuelve impenetrable, parecido al ladrillo. Como resultado, la sucesión secundaria del terreno de la selva tropical desmontada es muy lenta. La regeneración de incluso un trozo pequeño de selva talado toma alrededor de 70 años. Pese a no ser idóneas para la agricultura, las selvas tropicales se talan para obtener madera, o se queman para dedicar las tierras a la cría de ganado o a la agricultura, con una rapidez alarmante (FIGURA 29-10

FIGURA 29-10 El fuego devora la selva tropical del Amazonas en Brasil
El área quemada se destinará a la cría de ganado o a la agricultura; ambas actividades están condenadas al fracaso a causa de la mala calidad del suelo. Los incendios que se propagan y el humo que producen ponen en peligro a los árboles no talados y a la diversidad de habitantes de la selva.

ble, lo que significa obtener beneficios de un ecosistema en una forma que pueda sostenerse indefinidamente.

Bosques tropicales caducifolios

Un poco más lejos del ecuador, la precipitación pluvial no es ni cercanamente constante, es decir, hay temporadas húmedas y secas bien definidas. En estas regiones, que incluyen India y algunas zonas del sudeste asiático, América del Sur y América Central, crecen **bosques tropicales caducifolios**. Durante la temporada de sequía, los árboles no consiguen extraer agua suficiente del suelo para compensar la evaporación a través de sus hojas. En consecuencia, estas plantas se han adaptado a la estación seca perdiendo sus hojas, con lo que reducen al mínimo la pérdida de agua. Si las lluvias no regresan en la época acostumbrada, los árboles retardan la formación de hojas nuevas hasta que pasa la sequía.

Sabana

A lo largo de las márgenes del bosque tropical caducifolio, los árboles aparecen cada vez más separados unos de otros y crecen pastos entre ellos. Finalmente, los pastos llegan a ser la vegetación predominante, con sólo algunos árboles dispersos y bosques de matorrales espinosos por aquí y por allá; este bioma es la **sabana** (**FIGURA 29-11**). Por lo general, los pastizales de la sabana tienen una temporada de lluvias durante la cual cae prácticamente toda la precipitación del año: 300 mm o menos. Cuando la temporada seca hace su arribo, lo hace con gran ímpetu. Es posible que no llueva durante varios meses, por lo que el suelo se torna duro, seco y polvoriento. Los pastos están bien adaptados a este tipo de clima, pues crecen con gran rapidez durante la temporada de lluvias y luego mueren, para quedar sólo las raíces resistentes a la sequía durante la época de aridez. Sólo algunos árboles especializados, como la espinosa acacia o el baobab, que almacena agua, sobreviven en las devastadoras temporadas de sequía de la sabana. En las regiones donde la temporada de sequía es aún más pronunciada, prácticamente no crecen árboles y la sabana se transforma de manera gradual e imperceptible en pradera tropical.

ENLACES CON LA VIDA ¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales?

Los árboles de cacao, los granos que se utilizan para producir el chocolate, son nativos de las selvas tropicales de Centro y Sudamérica, pero ante la enorme demanda mundial de chocolate (tan sólo en Estados Unidos se consumen unos 1400 millones de kilogramos cada año), los árboles de cacao ahora se cultivan en países ecuatoriales por todo el mundo. En un intento por incrementar la producción, se han arrasado vastas extensiones de selvas tropicales para dar paso a las plantaciones de cacao. Las selvas tropicales desmontadas pierden rápidamente su fertilidad hasta que terminan por ser sólo pastizales. Ante la falta del ambiente diverso en el que crecen los árboles de cacao, los índices de polinización son bajos y aproximadamente un tercio de la cosecha de cacao se pierde cada año por las plagas. Al rociar las plantaciones con herbicidas, fungicidas y pesticidas se reduce la biodiversidad y se crean derramamientos de sustancias tóxicas.

En el año 2000 un grupo de compañías chocolateras, al reconocer la necesidad de proteger tanto los árboles de cacao como el hábitat de las selvas tropicales, establecieron la Fundación Mundial del Cacao (World Cocoa Foundation, WCF), cuya misión incluye producir "cacao de alta calidad en una forma sustentable y amigable con el ambiente". Esto incluye utilizar controles naturales de las plagas, siempre que sea posible. Varios países sudamericanos reconocen el valor de cultivar cacao en las condiciones en las que acostumbra crecer: bajo una bóveda de densa selva tropical. Este ambiente provee un hábitat extraordinario para una variedad de especies de la selva tropical. Por ejemplo, investigadores brasileños esperan que el tití león o tamarín de cabeza dorada, un primate recientemente descubierto y en grave peligro de extinción, pueda salvarse si su hábitat se extiende en la selva tropical de Brasil, que también sirve como terreno de cultivo para el cacao. La selva tropical cerca del Atlántico en Brasil se ha reducido a menos del 8 por ciento de su tamaño original, pero algunos funcionarios esperan que, gracias al cuidadoso cultivo del cacao, considerables porciones de la selva tropical se recuperen. Gracias a la Fundación Mundial del Cacao, ahora nos podemos sentir mejor al satisfacer nuestro gusto por el chocolate.

FIGURA 29-11 La sabana africana
a) Elefantes recorren la sabana bajo un arco iris. ***b)*** Un picabuey de pico rojo mira hacia arriba a un rinoceronte blanco dormido. Los picabueyes se alimentan de los parásitos que viven en la piel de los rinocerontes. ***c)*** Todavía es posible ver grandes manadas de animales que pastan, como las cebras, en las reservas africanas. Las manadas de herbívoros proveen alimento a la más extensa colección de grandes carnívoros de la Tierra. ***d)*** Los guepardos se dan un festín con su presa (tanto los guepardos como los rinocerontes están en peligro de extinción).

FIGURA 29-12 La caza furtiva es una amenaza para la fauna africana
Los cuernos de rinoceronte que, según creen algunos, tienen propiedades afrodisíacas, alcanzan precios exorbitantes y fomentan la caza furtiva. El rinoceronte negro ya está prácticamente extinguido.

La sabana africana contiene probablemente la colección más variada e impresionante de grandes mamíferos de todo el planeta. Entre estos mamíferos hay numerosos herbívoros, como el antílope, el ñu, el búfalo de agua, el elefante y la jirafa, además de carnívoros como el león, el leopardo, la hiena y el perro salvaje.

Efectos de las actividades humanas

La población humana de África, en rápida expansión, constituye una amenaza para la flora y fauna de la sabana. La cacería furtiva ha llevado al rinoceronte negro al borde de la extinción (FIGURA 29-12) y pone en peligro al elefante africano, una especie clave en ese ecosistema. Los abundantes pastos que hacen de la sabana un hábitat idóneo para tantos animales salvajes también la hacen adecuada para el pastoreo de ganado doméstico. Cada vez en mayor medida, las cercas constituyen un obstáculo para la migración de grandes manadas de herbívoros en busca de alimento y agua. Los ecólogos han descubierto que los herbívoros autóctonos son mucho más eficientes que el ganado para transformar el pasto en carne. Quizás en el futuro la sabana africana brinde sustento a manadas de antílopes y a otros animales nativos grandes que se alimentan de pasto, los cuales serán domesticados en vez de criar ganado.

Desiertos

Incluso los pastos resistentes a la sequía necesitan al menos de 250 a 500 mm de lluvia al año, de acuerdo con su distribución estacional y la temperatura media. Cuando caen menos de 250 mm de lluvia, se crean biomas de **desierto**. Aunque tendemos a pensar que los desiertos son calientes, en realidad se definen en función de la falta de lluvia, no de sus temperaturas. En el desierto de Gobi de Asia, por ejemplo, las temperaturas promedio están por debajo del punto de congelación durante la mitad del año, en tanto que el promedio de las temperaturas veraniegas fluctúa entre 41 y 43°C. Hay biomas de desierto en todos los continentes, por lo regular entre los 20 y los 30° de latitud norte y sur, y también en la sombra orográfica de las principales cordilleras.

Al igual que todos los biomas, los desiertos comprenden diversos ambientes. En un extremo se encuentran ciertas regiones del desierto del Sahara y del desierto de Atacama en Chile, donde prácticamente nunca llueve y no crece vegetación (FIGURA 29-13a). Es más común que los desiertos se caractericen por una vegetación muy espaciada y grandes áreas de suelo desnudo (FIGURA 29-13b). En muchos casos, las plantas perennes son arbustos o cactáceas con sistemas de raíces grandes pero poco profundas. Las raíces superficiales absorben rápidamente la humedad del suelo después de las tormentas poco frecuentes del desierto. El resto de la planta está cubierto, por lo regular, de una capa cérea e impermeable que impide la evaporación del agua tan preciada. El agua se almacena en los gruesos tallos de las cactáceas y otras plantas suculentas. Las espinas de las cactáceas son hojas modificadas con fines de protección y conservación de agua que prácticamente no presentan superficie de evaporación. En muchos desiertos toda la lluvia cae durante unas cuantas tormentas, y las flores silvestres anuales especializadas aprovechan el breve periodo de humedad para germinar, crecer, florecer y producir semillas a toda prisa, en cuestión de un mes o menos (FIGURA 29-14).

a) b) c)

FIGURA 29-13 Bioma de desierto
a) En las condiciones más extremas de calor y sequía, los desiertos están casi desprovistos de vida, como estas dunas de arena del desierto del Sahara, en África. ***b)*** En gran parte de los estados de Utah y Nevada, el desierto de la Gran Cuenca presenta un paisaje monótono de arbustos, como la artemisa y las quenopodiáceas, muy espaciados entre sí. Estos arbustos suelen secretar un inhibidor del crecimiento a través de sus raíces, lo que impide la germinación de plantas cerca de ellos y, por consiguiente, reduce la competencia por el agua.

FIGURA 29-14 Desierto de Sonora
Después de una primavera relativamente húmeda, este desierto se cubre de una alfombra de flores silvestres. Durante gran parte del año —en ocasiones durante varios años— las semillas de las flores silvestres permanecen aletargadas, en espera de las lluvias primaverales. PREGUNTA: ¿Cómo "determinan" las semillas de las plantas del desierto si la cantidad de lluvia es adecuada para la germinación?

Los animales de los desiertos, al igual que las plantas, están especialmente adaptados para sobrevivir en condiciones de calor y sequía. Son pocos los animales que pueden verse en los desiertos durante los calurosos días de verano. Muchos de ellos, incluidos el búho excavador, la rata canguro, el sapo del desierto, la tortuga del desierto y el crótalo cornudo, se refugian del calor en madrigueras subterráneas que se mantienen relativamente frescas y húmedas. La liebre del desierto se refugia bajo la sombra de rocas y arbustos; sus enormes orejas y largas patas son adaptaciones que irradian calor. Los reptiles como las serpientes del desierto, tortugas y lagartos ajustan su actividad de acuerdo con la temperatura. En el verano están más activos sólo a la hora del amanecer y del ocaso. Entre los animales que toman ventaja de las temperaturas frescas de la noche se incluyen las liebres, los murciélagos, los búhos excavadores y las ratas canguro (véase la figura 29-13c). Muchos de los animales del desierto más pequeños sobreviven sin beber agua jamás; toda la que necesitan la obtienen de su alimento y de la que se produce durante la respiración celular en sus tejidos. Los animales más grandes, como el carnero cuernilargo del desierto, dependen de abrevaderos permanentes durante las épocas más secas del año.

Efectos de las actividades humanas

Los ecosistemas desérticos son frágiles. Los ecólogos que estudian el suelo del desierto de Mojave, en el sur de California, encontraron recientemente huellas de rodamiento impresas por tanques en 1940, cuando el general Patton entrenaba tripulaciones de tanques como preparativo para entrar en la Segunda Guerra Mundial. El suelo de este desierto se encuentra estabilizado y enriquecido por cianobacterias microscópicas cuyos filamentos se entrelazan en medio de los granos de arena. Los tanques, y ahora los numerosos vehículos todoterreno que corren por el desierto con fines recreativos, destruyen esta importantísima red. Esto provoca que el suelo se erosione y reduce la cantidad de nutrimentos disponibles para las plantas de crecimiento lento del desierto. Los ecólogos estiman que el suelo del desierto tardará cientos de años en recuperarse totalmente del uso de vehículos pesados.

FIGURA 29-15 Desertificación
La población humana que rebasa la capacidad de carga reduce la capacidad de muchas regiones áridas (secas), como la región de Sahel en África, para sostener la vida; este proceso se llama desertificación.

Las actividades humanas están contribuyendo a la desertificación, el proceso por el que regiones relativamente secas y proclives a sufrir sequía se convierten en desiertos como resultado de las actividades humanas. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que la desertificación afecta una tercera parte del medio terrestre de nuestro planeta. Su principal causa es el uso inapropiado del terreno, incluidos la tala inmoderada de árboles y arbustos para obtener madera, el pastoreo excesivo del ganado y el agotamiento de las aguas superficiales y subterráneas para regar cultivos. La pérdida de vegetación, que humidifica el aire y estabiliza el suelo, permite que el terreno se erosione y que las sequías se intensifiquen, lo que diminuye la productividad de la tierra. La desertificación de la tierra es una consecuencia de la población humana que excede la capacidad de carga de un frágil ecosistema. Por ejemplo, la región de Sahel —una sabana seca al sur del desierto del Sahara— se ha sobreexplotado por el pastoreo y se ha degradado por la acción de una creciente población humana (**FIGURA 29-15**). Con gran entusiasmo, el "Proyecto Edén" en Nigeria, al oeste de África, está ayudando a reducir la desertificación suministrando a los cultivadores árboles frutales perennes que crecen en condiciones áridas, estabilizan los suelos y proveen alimento. El presidente de Gambia también ha puesto en marcha programas que apoyan la reforestación de la región de Sahel.

Chaparral

En muchas regiones costeras que colindan con desiertos, como el sur de California y gran parte del Mediterráneo, encontramos un tipo singular de vegetación conocido como

FIGURA 29-16 Bioma de chaparral
Este bioma, caracterizado por arbustos y pequeños árboles resistentes a la sequía, se limita por las regiones costeras y se mantiene gracias a los frecuentes incendios iniciados por los relámpagos. Algunos de los arbustos en este chaparral cerca de San Francisco, California, toman un color rojo brillante durante el otoño.

canza los 750 mm, casi toda la cual cae durante los fríos y húmedos inviernos que se alternan con veranos calurosos y secos. A la proximidad del mar se deben el leve alargamiento de la temporada de lluvias invernales, así como las frecuentes nieblas durante la primavera y el otoño. El chaparral se compone de árboles pequeños y arbustos resistentes a la sequía. Sus hojas, por lo general, son pequeñas y a menudo están cubiertas de diminutas vellosidades o capas protectoras que reducen la evaporación durante los meses secos de verano. Estos resistentes arbustos también soportan los frecuentes incendios que desencadenan los relámpagos durante el verano (**FIGURA 29-16**).

Pastizales

En las regiones templadas de América del Norte hay desiertos en las sombras orográficas al este de las cordilleras, como la Sierra Nevada y las montañas Rocallosas. Hacia el este, a medida que la precipitación pluvial aumenta poco a poco, el terreno comienza a sostener más y más pastos, hasta formar las praderas de la región central norte de Estados Unidos. Casi todos los biomas de **pastizal** o **pradera** están situados en el centro de los continentes, como en Norteamérica y Eurasia, donde reciben de 250 a 750 mm anuales de lluvia. En general, los pastizales tienen una cubierta continua de pasto y prácticamente carecen de árboles, salvo a lo largo de los ríos. Desde las praderas de pastos altos de Iowa, Missouri e Illinois, donde la lluvia es relativamente abundante (**FIGURA 29-17**) hasta las praderas de pastos bajos del este de Colorado, Wyoming y Montana (**FIGURA 29-18**), los pastizales de Norteamérica alguna vez se extendieron a lo largo de casi la mitad del continente.

El agua y el fuego son los factores fundamentales en la competencia entre pastos y árboles. Los veranos calurosos y secos, así como las frecuentes sequías de las praderas de pastos bajos son tolerados por estos últimos, pero resultan letales para los árboles. Los bosques son los ecosistemas clímax en las praderas de pastos altos de la región más oriental, pero históricamente los árboles fueron destruidos por los frecuentes incendios, iniciados por los relámpagos o por los indígenas de América del Norte con el propósito de mantener tierras de

FIGURA 29-17 Pradera de pastos altos
En el centro de Estados Unidos, los vientos que acarrean humedad del golfo de México producen las lluvias de verano, las cuales hacen posible el crecimiento exuberante de pastos altos y abundantes flores silvestres. Los incendios periódicos, ahora cuidadosamente regulados, impiden la invasión del bosque. PREGUNTA: ¿Por qué las praderas de pastos altos son uno de los biomas en mayor peligro de extinción en el mundo?

pastoreo para el bisonte. Aunque el fuego destruye la parte alta de los pastos, por lo regular sus sistemas de raíces sobreviven; los árboles, en cambio, mueren sin remedio. En un tiempo los pastizales de América del Norte sostenían enormes manadas de bisontes: hasta 60 millones de ellos a principios del siglo XIX. Todavía se puede ver al antílope americano en algunas praderas del oeste de Estados Unidos; el gato montés y el coyote son los principales depredadores grandes en esa región (en la figura 28-5 se ilustra una red alimentaria de pradera). Los pastos que crecieron y se descompusieron durante miles de años produjeron el que quizá sea el suelo más fértil del mundo. Un acre (4000 metros cuadrados) de una pradera de altos pastizales naturales en Estados Unidos da sustento a entre 200 y 400 diferentes plantas nativas.

Efectos de las actividades humanas

Cuando se inventaron arados capaces de abrirse paso entre los densos pastizales, quedó listo el escenario para transformar las praderas de la zona central norte de Estados Unidos en el "granero" de Norteamérica, así llamado por las enormes cantidades de grano que se cultivan en su fértil suelo. Las praderas de pastos altos, ahora uno de los ecosistemas en mayor peligro de extinción en el mundo, se han convertido en terrenos agrícolas. Sólo subsiste el 1 por ciento, que se mantiene protegido por medio de quemas periódicas controladas.

En la seca pradera occidental de pastos bajos, el ganado ha tomado el lugar del bisonte y del antílope americano. El pastoreo excesivo destruye los pastos, que pueden verse remplazados por la leñosa artemisa (**FIGURA 29-19**). Varios estados de las zonas occidental y central norte de Estados Unidos, al reconocer la importancia de estos biomas para la vida silvestre, tratan de evitar la expansión de las praderas de pastos bajos y de contribuir a la recuperación de las praderas de pastos

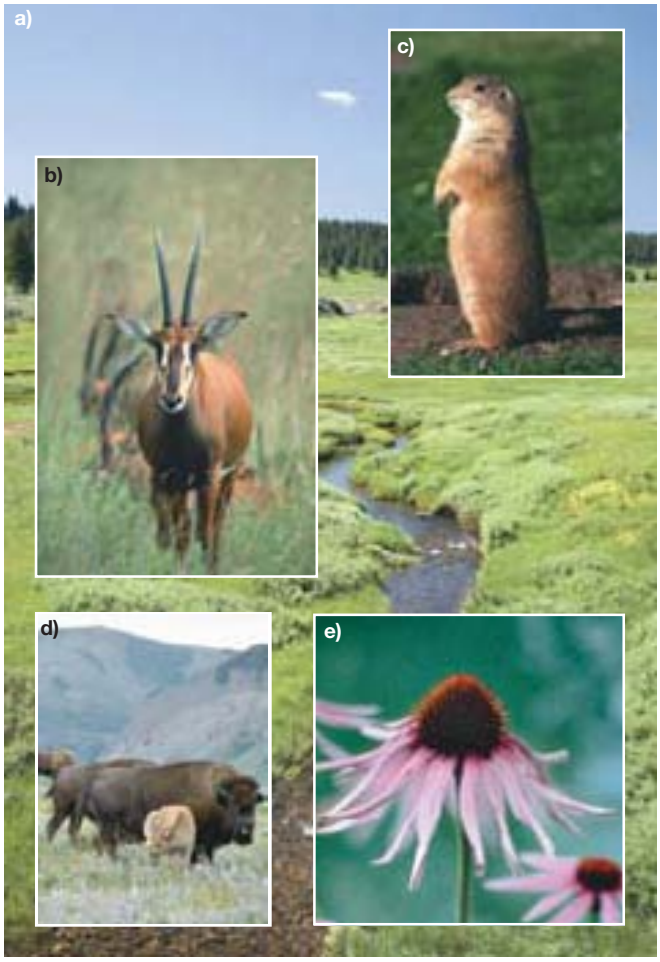


FIGURA 29-18 Pradera de pastos bajos
Las tierras situadas al este de las montañas Rocallosas reciben relativamente poca precipitación pluvial; el resultado es ***a)*** la pradera de pastos bajos, que se caracteriza por pastos arracimados de escaso crecimiento, como el gramillón y la grama. ***b)*** El antílope berrendo, ***c)*** los perros de la pradera y ***d)*** manadas de bisontes protegidas ocupan este bioma, en el que abundan ***e)*** las flores silvestres como esta equinácea.

altos. Los criadores de ganado reconocen cada vez más que limitar el pastoreo en tierras frágiles las mantiene productivas.

Bosques caducifolios de clima templado

En su margen oriental, los pastizales norteamericanos se fusionan para formar el bioma de **bosque caducifolio de clima templado**, también presente en Europa occidental y Asia oriental (FIGURA 29-20). Aquí la precipitación pluvial es más abundante que en los pastizales (de 750 a 1500 mm) y, en particular, llueve más durante el verano. El suelo retiene suficiente humedad para hacer posible el crecimiento de árboles y el bosque resultante aniquila con su sombra los pastos. En contraste con los bosques tropicales, el bioma de bosque caducifolio de clima templado tiene inviernos fríos, por lo regular con al menos varias heladas intensas y largos periodos de temperaturas por debajo del punto de congelación. En este bioma el invierno ejerce sobre los árboles un efecto similar al de la temporada de sequía en los bosques tropicales caducifolios: durante los periodos de temperaturas bajo cero los árboles no disponen de agua líquida. Con la finalidad de reducir la evaporación cuando el agua escasea, los árboles pierden sus hojas en el otoño y producen nuevas hojas en primavera,

FIGURA 29-19 ¿Desierto de artemisa o pradera de pastos bajos?
En los biomas influyen las actividades humanas además de la temperatura, la precipitación pluvial y el suelo. El campo de pradera de pastos cortos de la derecha ha sido pastado en exceso por el ganado; esto ha provocado que la artemisa ocupe ahora el lugar de los pastos.

FIGURA 29-20 Bioma de bosque caducifolio de clima templado
a) En los bosques caducifolios de clima templado de la región oriental de Estados Unidos, ***b)*** el ciervo de cola blanca es el herbívoro más grande y ***c)*** abundan las aves como el grajo azul. ***d)*** En primavera multitud de flores silvestres de los bosques (como estas hepáticas) florecen por corto tiempo antes de que los árboles produzcan hojas.

cuando nuevamente hay agua líquida disponible. Durante el breve lapso de la primavera en que el suelo ya se ha descongelado, pero los árboles no impiden aún por completo el paso de la luz solar, multitud de flores silvestres engalanan el suelo del bosque.

Los insectos y otros artrópodos son numerosos y llamativos en los bosques caducifolios. Los restos de hojas en descomposición que cubren el suelo del bosque también proveen alimento y hábitat a bacterias, lombrices de tierra, hongos y plantas pequeñas. Muchos artrópodos se alimentan de estas últimas, o bien, unos de otros. Diversos vertebrados, como ratones, musarañas, ardillas, mapaches, ciervos, osos y muchas especies de aves, habitan en los bosques caducifolios.

Efectos de las actividades humanas

Los grandes mamíferos depredadores, como el oso negro, el lobo, el gato montés y el puma solían ser abundantes, pero la caza y la pérdida de hábitat han mermado en forma importante su número y eliminado a los lobos de los bosques caducifolios. En muchos de estos bosques abunda el ciervo ante la ausencia de depredadores naturales. La tala para obtener madera, la agricultura y la construcción de viviendas han reducido en forma drástica los bosques caducifolios de Estados Unidos respecto a su extensión original; en la actualidad prácticamente no existen bosques caducifolios vírgenes. Sin embargo, a lo largo de los últimos 50 años, los datos del Servicio Forestal indican que la cubierta forestal de Estados Unidos (tanto de hoja perenne como caducifolia) ha aumentado como resultado del nuevo crecimiento de bosques en fincas agrícolas abandonadas, del reciclado del papel que reduce la demanda de pulpa de madera, de técnicas más eficientes para aserrar la madera y cultivar árboles, así como del uso de otros materiales de construcción.

Bosques de clima templado lluvioso

En las costas del Pacífico de Estados Unidos, desde las tierras bajas de la península Olímpica del estado de Washington hasta el sureste de Alaska, se encuentra el bioma de **bosque de clima templado lluvioso** (FIGURA 29-21

Taiga

Al norte de los pastizales y de los bosques de clima templado, la **taiga**, también conocida como **bosque septentrional de coníferas** (FIGURA 29-22), se extiende horizontalmente a lo ancho de toda América del Norte y Eurasia, incluidas partes del norte de Estados Unidos y gran parte del sur de Canadá. En la taiga las condiciones son más rigurosas que en el bosque caducifolio de clima templado: los inviernos son más largos y fríos y la temporada de crecimiento, más breve. Esto limita considerablemente la capacidad de los árboles para realizar fotosíntesis y adquirir tanto energía como nutrimentos. En consecuencia, la taiga está poblada casi en su totalidad de coníferas de hojas perennes con agujas angostas y cerosas que permanecen en los árboles durante todo el año. El recubrimiento céreo y la pequeña superficie de las agujas reducen la pérdida de agua por evaporación durante los meses fríos. Los árboles conservan su energía al no tener que regenerar todas sus hojas cada primavera, de manera que están preparados

FIGURA 29-21 Bioma de bosque de clima templado lluvioso
a) Bosque de clima templado lluvioso del río Hoh, en el Parque Nacional Olímpico. Las coníferas no impiden el paso de la luz con tanta eficacia como los árboles de hojas anchas; por esta razón, crecen helechos, musgos y flores silvestres bajo la pálida luz verdosa que llega al suelo del bosque. ***b)*** Los muertos alimentan a los vivos cuando crecen árboles nuevos a costa de la descomposición de este "tronco nodriza", y ***c)*** esta digital en floración y ***d)*** los hongos encuentran condiciones ideales en medio de la húmeda vegetación en descomposición.

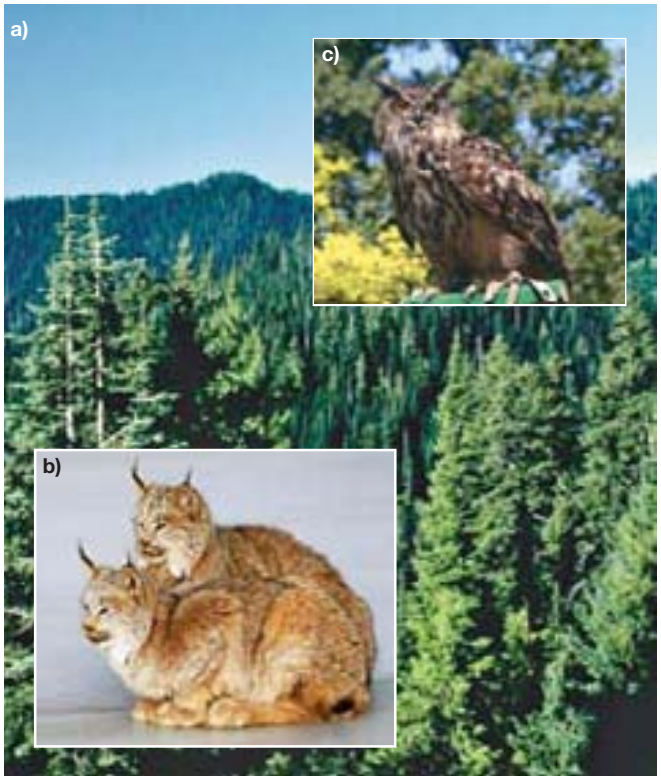


FIGURA 29-22 Bioma de taiga (o bosque septentrional de coníferas)
a) Las pequeñas agujas y la forma piramidal de las coníferas les permiten librarse de la nieve cuando ésta es muy abundante. Entre los depredadores de la taiga se encuentran ***b)*** el lince de Canadá y ***c)*** el gran búho cornudo.

para aprovechar de inmediato las condiciones favorables al crecimiento cuando llega la primavera. Debido al riguroso clima de la taiga, la diversidad de la vida es aquí mucho menor que en muchos otros biomas. Vastas extensiones de Alaska central, por ejemplo, están cubiertas de un bosque sombrío que consiste casi exclusivamente de picea negra y de alguno que otro abedul. Los grandes mamíferos como el bisonte de los bosques, el oso pardo americano, el alce y el lobo, todavía recorren la taiga, al igual que otros animales más pequeños como el glotón, la zorra, la liebre nival y el ciervo. Las poblaciones de lobos se encuentran en la taiga de Canadá y en los estados de Idaho, Michigan, Wisconsin, Minnesota y Montana (donde fueron introducidos al Parque Nacional Yellowstone).

Efectos de las actividades humanas

La taiga es una de las fuentes principales de madera para la construcción. El desmonte, es decir, la eliminación de todos los árboles de una determinada área para utilizar la madera en la fabricación de papel y la construcción, ha destruido enormes extensiones de bosque, tanto en Canadá como en la región del Pacífico noroccidental de Estados Unidos (**FIGURA 29-23**). Sin embargo, por lo alejado de la taiga más septentrional y la severidad de su clima, un porcentaje mayor de la taiga que de cualquier otro bioma norteamericano, a excepción de la tundra, permanece intacto.

Tundra

El último bioma que se alcanza antes de llegar al casquete polar es la **tundra** ártica, una vasta región desprovista de árboles que colinda con el Océano Ártico (**FIGURA 29-24**). En la tundra las condiciones son muy rigurosas. Las temperaturas invernales de la tundra ártica suelen alcanzar los –55°C o menos, los vientos soplan a una velocidad de 50 a 100 kilómetros por hora y la precipitación alcanza un promedio anual de 250 mm o menos, lo que convierte a este bioma en un "desierto helado". Incluso en verano, las temperaturas llegan a bajar al punto de congelación y la temporada de crecimiento puede durar tan sólo unas cuantas semanas. Unas condiciones algo menos frías, aunque similares, crean la tundra alpina en las cumbres de las montañas por encima de la altitud a la que los árboles crecen.

FIGURA 29-23 Desmonte
El desmonte, como el que se ha practicado en este bosque de Oregon, es relativamente simple y económico, pero sus costos ambientales son altos. La erosión merma la fertilidad del suelo y retarda el crecimiento de plantas nuevas. Por añadidura, los densos grupos de árboles de la misma edad, que por lo regular vuelven a crecer, son más vulnerables al ataque de parásitos que un grupo natural de árboles de diversas edades.

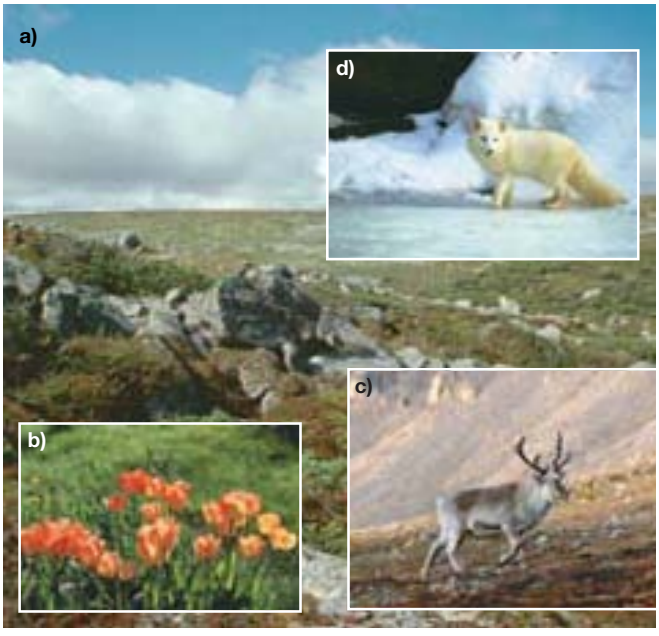


FIGURA 29-24 Bioma de tundra
a) La vida de la tundra está adaptada al frío. ***b)*** Plantas como los sauces enanos y las flores silvestres perennes (como este trébol enano) crecen muy próximos al suelo para escapar del gélido viento de la tundra. Los animales de la tundra, como ***c)*** el caribú y ***d)*** la zorra del Ártico, regulan el flujo de sangre en sus patas con la finalidad de mantenerlas apenas lo suficientemente calientes para evitar que se congelen, al mismo tiempo que conservan el preciado calor corporal para el cerebro y los órganos vitales.

El frío clima de la tundra ártica da lugar a lo que se conoce como ***permafrost***, una capa de suelo permanentemente congelada, por lo regular situada a no más de 50 centímetros por debajo de la superficie. En consecuencia, cuando llegan los deshielos estivales el agua líquida que se produce al fundirse la nieve y el hielo no penetra en el suelo, la tundra se convierte en un enorme pantano. Los árboles no sobreviven en la tundra, en parte porque el *permafrost* limita severamente la profundidad a la que las raíces pueden penetrar.

A pesar de ello, la tundra sostiene formas de vida sorprendentemente abundantes y variadas. El suelo está tapizado de pequeñas flores perennes, sauces enanos de unos cuantos centímetros de altura y grandes líquenes conocidos como "musgo de los renos", uno de los alimentos preferidos del caribú. El agua estancada ofrece un soberbio hábitat para los mosquitos. Éstos y otros insectos sirven de alimento a numerosas aves, la mayor parte de las cuales recorren largas distancias para anidar y criar a sus pequeños durante el breve festín veraniego. La vegetación de la tundra brinda sustento a los lemming, que sirven de alimento a lobos, búhos nivales, zorras del Ártico e incluso osos pardos.

Efectos de las actividades humanas

La tundra es uno de los biomas más frágiles a causa de su breve temporada de crecimiento. Un sauce de 10 centímetros de altura puede tener un tronco de siete centímetros de diámetro y una edad de 50 años. Las actividades humanas en la tundra dejan cicatrices que persisten durante siglos. Por fortuna para los habitantes de la tundra, la influencia de la civilización se concentra en torno a las instalaciones de perforación de pozos petroleros, las tuberías, las minas y las bases militares.

La precipitación pluvial y la temperatura determinan la vegetación que un bioma es capaz de sostener

29-22). Como consecuencia de la baja temperatura promedio anual (de alrededor de 25°F o − 4°C), hay *permafrost* debajo de gran parte del suelo. Durante el deshielo de verano la taiga hace honor a su nombre en ruso, "bosque de pantanos", pese a que su nivel de precipitación pluvial es casi la misma que la del desierto de Sonora.

29.4 ¿CÓMO SE DISTRIBUYE LA VIDA EN EL MEDIO ACUÁTICO?

Los ecosistemas de agua dulce incluyen lagos, corrientes y ríos

Aunque los ecosistemas acuáticos son tan diversos como los terrestres, comparten tres características generales. En primer lugar, como el agua se calienta y se enfría con más lentitud que el aire, las temperaturas de los sistemas acuáticos son más moderadas que las de los ecosistemas terrestres. En segundo lugar, el agua absorbe luz; aunque el agua parece ser muy transparente, a profundidades de 200 metros o más, la luz que llega es prácticamente insuficiente para llevar a cabo la fotosíntesis. Los *sedimentos* suspendidos (partículas inanimadas que son transportadas por el agua en movimiento) o los microorganismos reducen considerablemente la entrada de luz. Por último, los nutrimentos de los sistemas acuáticos tienden a concentrarse cerca de los sedimentos del fondo, de manera que donde los nutrimentos abundan, los niveles de luz son menores. De los cuatro requisitos para que haya vida, los ecosistemas acuáticos suministran agua en abundancia y temperaturas idóneas. Por consiguiente, la disponibilidad de energía y nutrimentos determina en buena parte la cantidad de vida y su distribución en los ecosistemas acuáticos.

Los lagos de agua dulce tienen regiones de vida definidas

Los lagos de agua dulce se forman cuando enormes depresiones naturales se llenan de agua proveniente de diversas fuentes que incluyen filtraciones de aguas subterráneas, corrientes o escurrimientos de lluvia o nieve derretida. Los lechos de los lagos tienen diversos orígenes. Muchos de ellos fueron excavados por los glaciares mientras recorrían el paisaje hace miles de años; otros se formaron cuando los corrimientos de tierras o de escombros depositados por ríos que fluían lentamente formaron presas conteniendo el agua detrás de ellas. Unos cuantos, como el Lago del Cráter en Oregon, ocupan los conos remanentes de volcanes extinguidos.

Aunque los lagos varían considerablemente en tamaño, profundidad y contenido de nutrimentos, los lagos tanto grandes como pequeños en climas templados comparten algunas características, incluidas zonas distintivas de vida. La distribución, la cantidad y el tipo de vida en los lagos depende en buena parte del acceso a la luz, a los nutrimentos y, en algunos casos, de un lugar donde fijarse (el fondo). Aunque los pequeños lagos, llamados *estanques*, a menudo reciben gran cantidad de luz y de nutrimentos incluso en el fondo, los lagos de mayores dimensiones presentan *zonas de vida* que corresponden a profundidades específicas (**FIGURA 29-25**).

Cerca de la ribera se localiza la **zona litoral**. En esta zona el agua es poco profunda y las plantas encuentran luz en abundancia, anclaje y nutrimentos adecuados de los sedimentos del fondo. Las comunidades de la zona litoral son las más variadas e incluyen plantas como las espadañas, los juncos y los

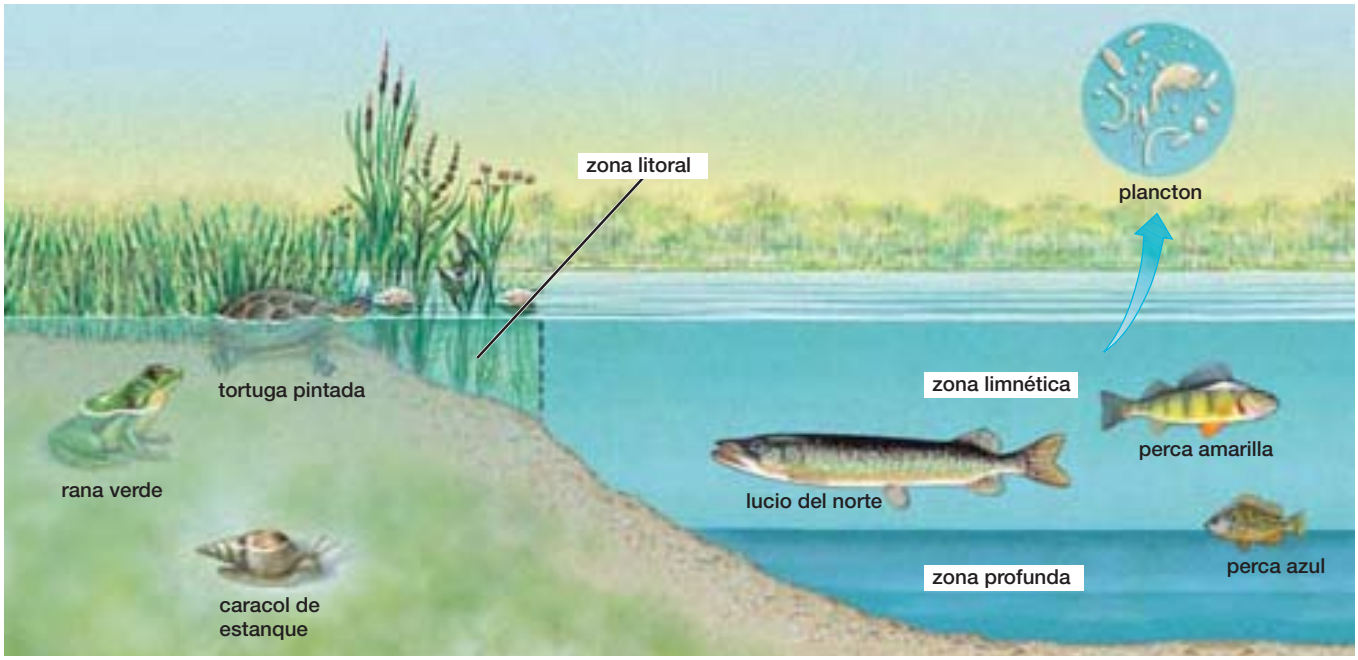


FIGURA 29-25 Zonas de vida lacustre
Un lago "típico" tiene tres zonas de vida: una zona litoral próxima a la ribera con plantas de raíz, una zona limnética de aguas abiertas y una zona profunda y oscura. Los peces nadan por todas ellas.

lirios acuáticos cerca de la ribera, así como plantas y algas totalmente sumergidas en las partes más profundas de la zona litoral. La mayor diversidad de vida animal también se encuentra en la zona litoral; entre los vertebrados se encuentran ranas, peces (como el lucio y la perca), víboras y tortugas acuáticas. Entre los animales invertebrados del litoral hay crustáceos (como cangrejos de río), larvas de insectos, caracoles y gusanos planos. Las aguas litorales también son el hogar de organismos microscópicos que, en conjunto, reciben el nombre de **plancton**. Existen dos formas de plancton: el **fitoplancton** ("plantas a la deriva", en griego), compuesto de protistas y bacterias fotosintéticos, además de algas que forman masas de filamentos microscópicos; y el **zooplancton** ("animales a la deriva", en griego), que incluye protistas no fotosintéticos y crustáceos diminutos.

A medida que la profundidad aumenta, las plantas ya no consiguen anclarse en el fondo y, al mismo tiempo, realizar la fotosíntesis. Esta zona de agua abierta se divide en dos regiones: la *zona limnética* alta y la *zona profunda* baja (véase la figura 29-25). En la **zona limnética** penetra suficiente luz para llevar a cabo la fotosíntesis; allí predominan el plancton, los peces y las plantas flotantes como la lenteja acuática. Por debajo de la zona limnética se encuentra la **zona profunda**, donde la luz es insuficiente para la fotosíntesis. Esta zona se nutre principalmente de los detritos que caen del litoral y de las zonas limnéticas, así como de los sedimentos que entran en ella. Sus habitantes principales son descomponedores y comedores de detritos, como bacterias, caracoles y larvas de insectos, además de los peces que nadan libremente entre las diversas zonas.

Los lagos de agua dulce se clasifican según su contenido de nutrimentos

En ocasiones los lagos de agua dulce se clasifican, sobre la base de su contenido de nutrimentos, en *eutróficos* ("bien alimentados", en griego) y *oligotróficos* ("mal alimentados", en griego). Como cabe esperar, muchos caen en medio de los dos grupos y se clasifican como *mesotróficos* ("medianamente alimentados"). Aquí describiremos los dos extremos.

Los **lagos oligotróficos** contienen muy pocos nutrimentos y la vida en ellos es relativamente escasa. Muchos deben su existencia a los glaciares que excavan depresiones en la roca desnuda y son alimentados por arroyos de montaña. Ante la escasez de sedimentos y vida microscópica que enturbien el agua, los lagos oligotróficos son cristalinos y la luz penetra a gran profundidad. Peces como la trucha, que requieren de agua bien oxigenada, a menudo prosperan en lagos oligotróficos porque hay escasa materia orgánica en descomposición que agote el oxígeno.

Los **lagos eutróficos** reciben aportaciones mayores de sedimentos, materia orgánica y nutrimentos inorgánicos (como el fósforo) del entorno, lo que les permite brindar sustento a comunidades densas (**FIGURA 29-26**). Estos lagos son más turbios tanto por los sedimentos en suspensión como por las

FIGURA 29-26 Un lago eutrófico
Ricos en nutrimentos disueltos gracias a los escurrimientos de la tierra —a menudo resultado de actividades humanas como la agricultura—, los lagos eutróficos brindan sustento a densas poblaciones de algas, fitoplancton y tanto a plantas flotantes como de raíz.

densas poblaciones de fitoplancton; por esta razón, la zona limnética iluminada es menos profunda. Los cuerpos muertos de los productores y de otras formas de vida caen a la zona profunda, donde sirven de alimento a los organismos descomponedores. Las actividades metabólicas de estos descomponedores consumen oxígeno, por lo que este elemento a menudo es escaso en la zona profunda de los lagos eutróficos.

Aunque los lagos muy grandes llegan a existir durante millones de años, con el tiempo, conforme se acumulan los sedimentos ricos en nutrimentos, los lagos oligotróficos tienden a convertirse en eutróficos por un proceso conocido como *eutroficación*. Este mismo proceso —que opera para los grandes lagos a lo largo del tiempo geológico— provoca que los lagos finalmente cedan el paso a tierra seca (véase el capítulo 27).

Efectos de las actividades humanas

Las actividades humanas aceleran considerablemente el proceso de eutroficación en virtud de los nutrimentos que se transportan a los lagos provenientes de fincas agrícolas, comederos, sistemas de alcantarillado e incluso céspedes suburbanos fertilizados. Los lagos enriquecidos en exceso se llenan de microorganismos cuyos cadáveres son objeto de ataque por parte de bacterias que agotan el oxígeno del agua. Las interacciones normales de la comunidad se trastornan al asfixiarse los organismos de niveles tróficos más altos. El lago Erie está sufriendo una severa eutrofización provocada por los detergentes con alto contenido de fosfato y por los escurrimientos que provienen de los campos agrícolas fertilizados, que, en conjunto, nutren densas poblaciones de fitoplancton. Existen acuerdos entre Estados Unidos y Canadá que han mejorado considerablemente la calidad del agua del lago Erie ayudando a evitar la eutrofización de los lagos de mayores dimensiones. Las especies invasoras siguen siendo un problema en los lagos mayores; los Grandes Lagos albergan unas 150 especies no nativas, incluido el mejillón cebra.

La lluvia ácida (véase el capítulo 28) plantea una amenaza de carácter muy diferente, en particular para los lagos pequeños y los estanques de agua dulce. En las montañas de Adirondack del estado de Nueva York, aproximadamente el 25 por ciento de los lagos han quedado sin vida a causa de la lluvia ácida. Puesto que las plantas de energía ahora emiten menos dióxido de azufre, muchos de estos lagos están mostrando signos de mejoría.

Las corrientes recolectan las aguas superficiales y la canalizan hacia los ríos

Las corrientes a menudo comienzan en las montañas donde el escurrimiento de la lluvia y la nieve derretida caen sobre la roca impermeable, la región *fuente* que se destaca en la **FIGURA 29-27**. Pequeños sedimentos llegan a las corrientes en este punto, el fitoplancton es escaso y el agua, clara y fría. Las algas se adhieren a las rocas en el lecho de la corriente, donde las larvas de insectos encuentran alimento y refugio. La turbulencia mantiene las corrientes provenientes de las montañas bien oxigenadas, por lo que constituyen un hogar adecuado para las truchas que se alimentan de larvas de insectos.

A menores alturas, en la región *de transición*, emergen pequeñas corrientes laterales o *subafluentes* las plantas acuáticas, las algas y el fitoplancton proliferen. Peces como la lubina negra, la perca azul y el bagre de canal (que requieren menos oxígeno que las truchas) viven aquí.

Conforme el terreno se vuelve más bajo y plano, el río se calienta, se ensancha y se vuelve lento y sinuoso. Corrientes laterales transportan sedimentos, ricos en nutrimentos y los depositan en el lecho del río. El agua se vuelve turbia con sedimentos y densas poblaciones de fitoplancton. Las bacterias descomponedoras agotan el oxígeno en el agua más profunda, pero las carpas y los bagres aún pueden prosperar donde el oxígeno es relativamente escaso. Cuando las lluvias o la nieve derretida son abundantes, el río inunda las tierras planas circundantes, o *llanuras de aluvión*, depositando una capa rica en sedimentos en el ecosistema terrestre adyacente.

Los ríos van a dar a los lagos o a otros ríos que finalmente los conducen al océano. Conforme el río se aproxima al nivel del mar, la tierra se aplana, la rapidez del flujo disminuye y los sedimentos se depositan. Esto interrumpe el flujo del río, descomponiéndolo en pequeños canales en medio de los ricos sedimentos. El agua salada del océano se mezcla con la entrante agua dulce, formando los **estuarios**, que son tierras pantanosas que brindan sostén a una enorme diversidad y productividad biológica.

La mayoría de las tierras húmedas de Estados Unidos son hábitat de agua dulce

La mayor parte de las tierras húmedas de Estados Unidos, llamadas ciénagas, pantanos, esteros o marismas, son ecosistemas de agua dulce. Algunos están aislados, mientras que otros se localizan cerca de los lagos o dentro de las llanuras de aluvión que forman los ríos. Los pantanos actúan como esponjas gigantes que absorben el agua cuando ésta es abundante y ayudan a reabastecer el subsuelo. Proveen lugares de crianza, alimentación y refugio para los peces de agua dulce, así como para muchas especies de aves y mamíferos. La región de los Everglades, en el sur de Florida, se cuenta entre las tierras húmedas más extensas del mundo.

Efectos de las actividades humanas

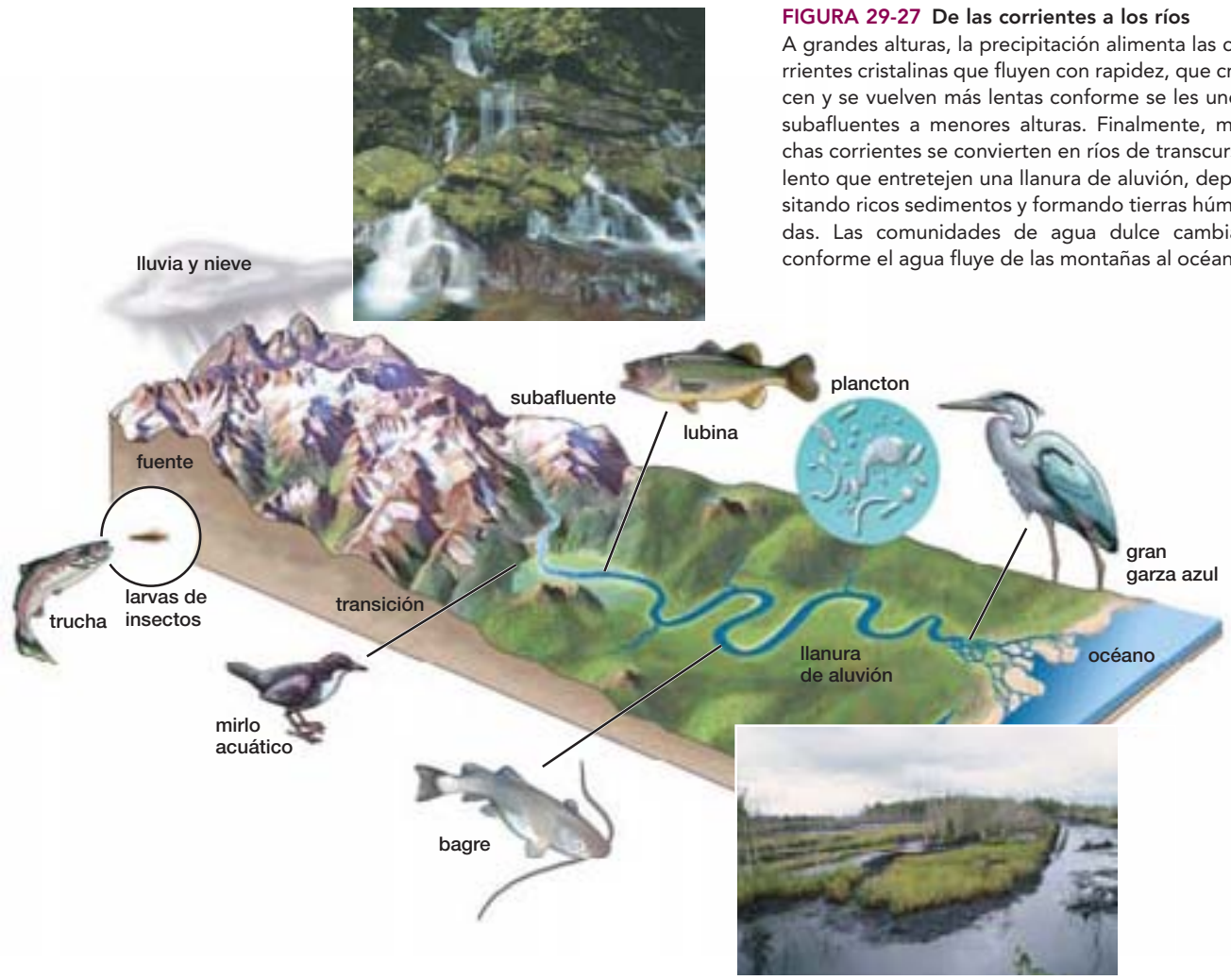


FIGURA 29-27 De las corrientes a los ríos
A grandes alturas, la precipitación alimenta las corrientes cristalinas que fluyen con rapidez, que crecen y se vuelven más lentas conforme se les unen subafluentes a menores alturas. Finalmente, muchas corrientes se convierten en ríos de transcurso lento que entretejen una llanura de aluvión, depositando ricos sedimentos y formando tierras húmedas. Las comunidades de agua dulce cambian conforme el agua fluye de las montañas al océano.

trabajando en la restauración de los ríos y las corrientes que brindan sustento a comunidades ricas en vida silvestre, incluyendo las poblaciones de salmón en peligro de extinción.

La tala de árboles y el drenado de agua dulce de tierras húmedas para la construcción, usos comerciales y la agricultura han reducido las extensiones de pantanos de agua dulce casi a la mitad en Estados Unidos. Además de eliminar hábitat de vida silvestre, esta pérdida contribuye a aumentar la severidad de las inundaciones. Por fortuna, organizaciones locales, estatales y federales han promulgado leyes y han fomentado las asociaciones para proteger los pantanos existentes y restaurar aquellos que han sufrido degradación. Como resultado, la tasa de pérdida de tierras pantanosas ha disminuido en Estados Unidos. Uno de los mayores intentos de restauración de un ecosistema es el Plan de Restauración de los Everglades, que aún está en proceso (véase el capítulo 30).

Los ecosistemas marinos cubren gran parte de la Tierra

En los océanos la capa superior de agua hasta una profundidad de aproximadamente 200 metros, donde la luz aún tiene la intensidad suficiente para hacer posible la fotosíntesis, se conoce como **zona fótica**. Por debajo de la zona fótica se encuentra la **zona afótica**, donde la energía proviene únicamente del excremento y del cuerpo de los organismos que se hunden o que nadan a esas profundidades ( ).

Al igual que en los lagos, en los océanos la mayor parte de los nutrimentos se encuentra en el fondo o cerca de él, donde no hay suficiente luz para la fotosíntesis. Los nutrimentos disueltos en el agua de la zona fótica se incorporan constantemente al cuerpo de los organismos vivos y llegan al fondo marino cuando éstos mueren. Los nutrimentos se reponen gracias a dos fuentes principales: los escurrimientos de la tierra y la **surgencia** de las profundidades del océano. La surgencia ocurre alrededor de la Antártida y a lo largo de los litorales occidentales, como en California, Perú y África Occidental, donde los vientos dominantes desplazan el agua de la superficie y provocan que sea sustituida por agua fría y rica en nutrimentos de las profundidades. Como es de esperar, las mayores concentraciones de vida en los océanos se encuentran donde se combina la abundancia de luz con una fuente de nutrimentos, lo cual ocurre sobre todo en las regiones donde hay surgencia y en aguas costeras poco profundas.

Las aguas costeras sostienen la vida marina más abundante

Las zonas intermareas y próximas a las orillas

La mayor abundancia de vida en los océanos se encuentra en una estrecha franja que rodea las masas terrestres, donde el agua es poco profunda y adonde llega un flujo constante de nutrimentos provenientes de la tierra. Las aguas costeras se componen de la

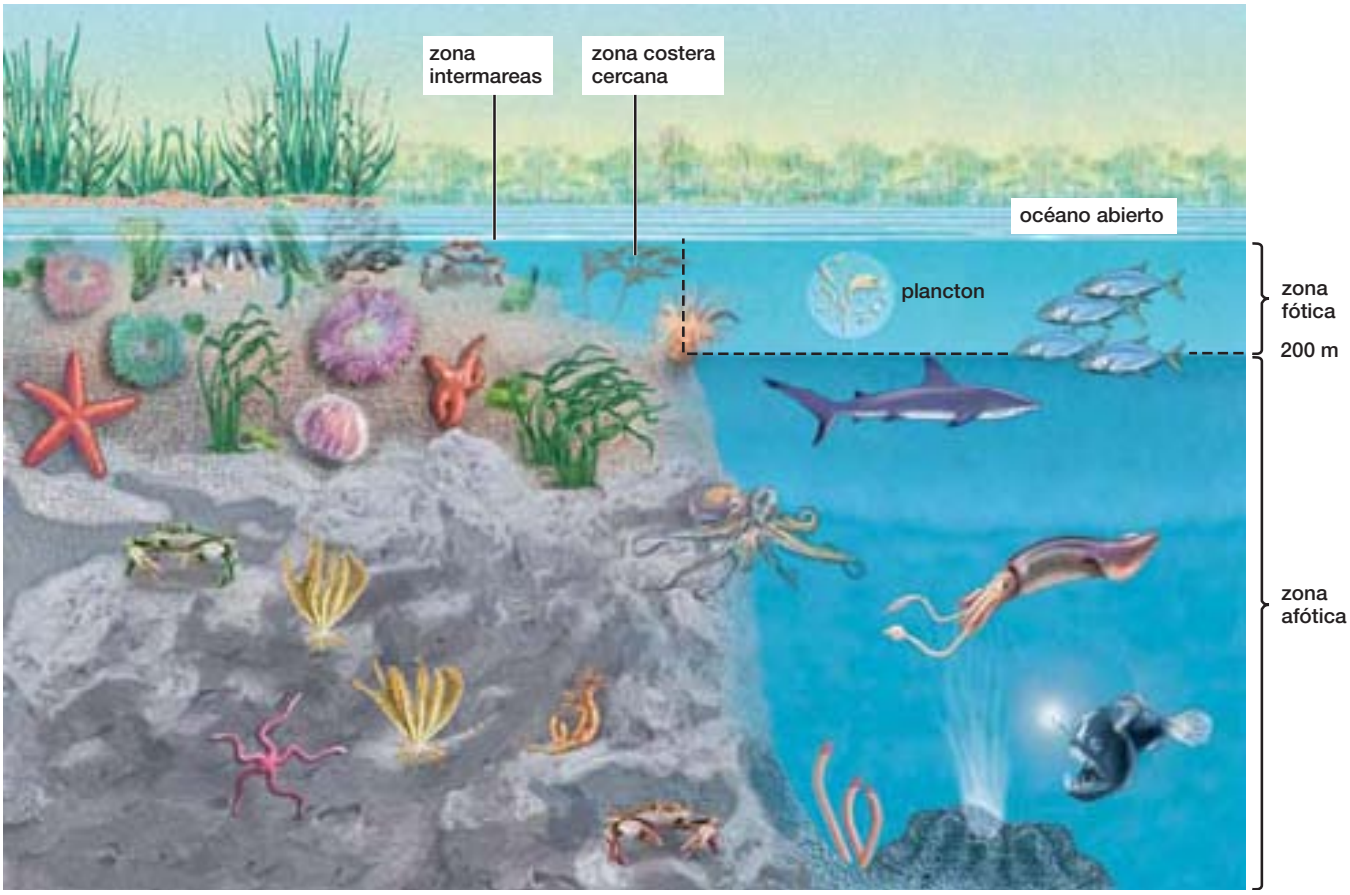


FIGURA 29-28 Zonas de vida oceánica
La fotosíntesis puede efectuarse sólo en la zona fótica superior, que incluye la región intermareas y la zona costera cercana, así como las aguas superiores del océano abierto. La vida que permanece en la zona afótica depende del material rico en energía que flota a la deriva proveniente de la zona fótica o, en el caso único de las comunidades hidrotermales, de la energía almacenada en el sulfuro de hidrógeno.

deja al descubierto alternativamente al subir y bajar la marea, y la **zona costera cercana**, el área relativamente poco profunda, pero siempre sumergida, que incluye las bahías y los pantanos costeros (**FIGURA 29-29** de peces e invertebrados, los que, a la vez, sirven de alimento a nutrias de mar y focas (véase la figura 29-29d). La productividad de los pantanos de agua dulce y de agua salada se encuentra en segundo lugar, sólo después de la productividad de las selvas tropicales.

Efectos de las actividades humanas

A medida que la población aumenta en las regiones cercanas a la costa y conforme recursos como el petróleo se vuelven cada vez más escasos, se intensifica el conflicto entre la preservación de los pantanos costeros como hábitat de la vida silvestre y el desarrollo de estas áreas para vivienda, puertos, dársenas para yates y extracción de energía. Los estuarios también se ven amenazados por los escurrimientos de las actividades agrícolas, los cuales proveen una gran cantidad de nutrimentos que fomentan el crecimiento excesivo de productores, cuyos cuerpos en descomposición agotan el oxígeno del agua, exterminando peces e invertebrados. La pérdida de grandes extensiones de pantanos costeros, que sirven como zonas de transición entre la tierra y el mar, aumentaron el daño provocado por el huracán Katrina en Nueva Orleáns, Louisiana, en 2005. Por fortuna, los esfuerzos conservacionistas han frenado la pérdida de pantanos en Estados Unidos, y algunos de ellos, como los Everglades de Florida, se han recuperado.

FIGURA 29-29 Ecosistemas cercanos a la costa
a) Una marisma del este de Estados Unidos. Extensiones de agua poco profunda bordeadas de hierba de los pantanos (*Spartina*) constituyen un excelente hábitat y lugares de cría para muchos organismos marinos y aves costeras. ***b)*** Aunque las arenas movedizas representan un obstáculo para la vida, las hierbas las estabilizan y animales como este cangrejo *Emerita* (recuadro) excavan en la arenosa zona intermareas. ***c)*** Costa intermareas rocosa de Oregon, donde los animales y las algas se aferran a la roca contra las olas batientes y resisten la sequía durante la bajamar. (Imagen en recuadro) Unas vistosas estrellas de mar se aferran a las rocas rodeadas de algas (*Fucus*). ***d)*** Quelpos (algas marinas) altísimos se balancean en las transparentes aguas a cierta distancia de la costa sur de California y constituyen la base de una variada comunidad de invertebrados, peces y (recuadro) una que otra nutria marina. PREGUNTA: Los ecosistemas cercanos a la costa tienen la más alta productividad en el océano. ¿Qué factores explican esto? ¿Cuál de los ecosistemas ilustrados aquí crees que tiene la productividad más elevada y por qué?

Arrecifes de coral

En las cálidas aguas tropicales, cuando se da la combinación correcta de profundidad del fondo, acción de las olas y nutrimentos, ciertas algas especializadas y corales construyen arrecifes con sus propios esqueletos de carbonato de calcio. Los **arrecifes de coral** abundan sobre todo en las aguas tropicales de los océanos Pacífico e Índico, en el Caribe y en el golfo de México hasta el extremo sur de Florida, donde las temperaturas máximas del agua fluctúan entre 22 y 28°C.

Los corales constructores de arrecifes, emparentados con las anémonas, albergan ciertas algas unicelulares fotosintéticas en el interior de sus tejidos, en una relación mutualista. Las algas representan hasta la mitad del peso del pólipo coralino y dan a los corales sus brillantes y variados colores (**FIGURA 29-30**

FIGURA 29-30 Arrecifes de coral
a) Los arrecifes de coral, que se componen de cuerpos de corales y algas, crean el hábitat de una comunidad extraordinariamente variada de animales de colores extravagantes. ***b)*** Muchos peces, entre ellos este cirujano azul, se alimentan de coral (advierte los corales de color amarillo brillante en el fondo). Una inmensa variedad de invertebrados, como ***c)*** esta esponja y ***d)*** este pulpo de anillos azules, viven entre los corales de la Gran Barrera de Arrecifes de Australia. Este diminuto pulpo (de 15 centímetros totalmente extendido) es una de las criaturas más venenosas del planeta. PREGUNTA: ¿Por qué la "decoloración" amenaza la vida de los arrecifes de coral? ¿Qué provoca la decoloración?

Efectos de las actividades humanas

Todo lo que disminuya la transparencia del agua perjudica a los socios fotosintetizadores del coral y dificulta el crecimiento de éste. Cuando la gente cultiva, tala o urbaniza terrenos costeros, la erosión acarrea limo al agua y un exceso de nutrimentos que fomentan la eutrofización que reduce tanto la luz solar como el oxígeno. El limo ha arruinado varios arrecifes cerca de Honolulu, Hawai. En las Filipinas, la tala de selvas vírgenes ha intensificado terriblemente la erosión, lo que provoca la destrucción de arrecifes de coral y de selvas tropicales.

En muchos países tropicales, de los arrecifes se recolectan moluscos, tortugas, peces, crustáceos y los corales mismos con más rapidez que aquella con la que pueden reproducirse. Muchos de ellos se venden a los turistas, coleccionistas de conchas y dueños de acuarios de los países desarrollados. La eliminación de peces e invertebrados depredadores de los arrecifes puede trastornar el equilibrio ecológico de la comunidad y permitir un crecimiento desproporcionado de las poblaciones de erizos o estrellas de mar, que se alimentan de los corales.

Complejas interacciones derivadas de las actividades humanas y del calentamiento global aceleran la propagación de enfermedades entre los corales. La *decoloración del coral* ocurre cuando las aguas se calientan demasiado, lo que provoca que los corales expulsen sus coloreadas algas simbióticas y queden de un color blanco. En 2002 la Gran Barrera de Arrecifes de Australia sufrió decoloración en el 60 por ciento de sus corales. Las algas regresarán si el agua se enfría; pero sin sus algas asociadas, los corales morirán poco a poco de inanición. Los arrecifes de coral de Florida padecen los efectos de la decoloración, las infecciones y los sedimentos que nublan el agua y promueven el crecimiento de algas dañinas. Más de un millón de buzos y de personas que practican el *snorkel* visitan estos arrecifes anualmente y en ocasiones provocan daños a los corales.

Sin embargo, también hay algunas buenas noticias. La prohibición de la pesca en pequeñas reservas de arrecifes de coral en los cayos de Florida ha permitido la recuperación de varias especies importantes. Muchos arrecifes de coral también están protegidos como parte de los santuarios marinos más grandes del mundo: el parque marino de la Gran Barrera de Arrecifes de Australia y el Monumento Nacional Marino de las Islas Hawaianas del Noroeste. En conjunto, unas 20,000 especies prosperan en estas dos zonas de concentración de biodiversidad.

El océano abierto

Más allá de las regiones costeras se extienden inmensas regiones del océano donde el fondo está a una profundidad demasiado grande, lo que hace imposible que las plantas puedan fijarse a él y, al mismo tiempo, reciban la luz suficiente para

crecer. En el océano abierto (FIGURA 29-31), la mayor parte de la vida se limita a la zona fótica superior, donde las formas de vida son **pelágicas** —es decir, nadan o flotan libremente— durante toda su existencia. La red alimentaria del océano abierto depende del fitoplancton, que se compone de protistas fotosintéticos microscópicos, principalmente diatomeas y dinoflagelados (figura 29-31d). Estos organismos son consumidos por el zooplancton, compuesto de pequeñísimos crustáceos que son parientes de los cangrejos y las langostas (figura 29-31e). El zooplancton, a la vez, sirve de alimento a invertebrados más grandes, peces pequeños e incluso mamíferos marinos como la ballena jorobada (véase la figura 29-31b).

Para mantenerse a flote en la zona fótica, donde la luz solar y el alimento son abundantes, muchos integrantes de la comunidad planctónica tienen gotitas de aceite en sus células o protuberancias largas para retardar su hundimiento (véase la FIGURA 29-31d). Casi todos los peces cuentan con vejigas natatorias que llenan de gas para regular su flotabilidad. Algunos animales nadan activamente para permanecer en la zona fótica. Muchos crustáceos pequeños migran a la superficie de noche para alimentarse y luego se hunden a las profundidades oscuras durante el día, con lo cual evitan a los depredadores que los localizan mediante el sentido de la vista, como los peces. La cantidad de vida pelágica varía enormemente de un lugar a otro. La azul transparencia de las aguas tropicales se debe a la falta de nutrimentos, que limita la concentración de plancton en el agua. Las aguas ricas en nutrimentos que sostienen una comunidad grande de plancton son verdosas y relativamente turbias.

FIGURA 29-31 El océano abierto
El océano abierto sostiene una vida abundante en la zona fótica, incluidos mamíferos marinos como ***a)*** las marsopas, ***b)*** las ballenas jorobadas y ***c)*** peces como el jurel azul. ***d)*** El fitoplancton fotosintético es el productor del que depende, en última instancia, la mayor parte del resto de la vida marina. El fitoplancton sirve de alimento al ***e)*** zooplancton, representado aquí por este diminuto crustáceo. Las protuberancias espinosas de estas criaturas planctónicas les ayudan a no hundirse más abajo de la zona fótica.

Efectos de las actividades humanas

Dos grandes amenazas para el océano abierto son la contaminación y la pesca excesiva. Los navíos que surcan los mares arrojan diariamente por la borda millones de recipientes de plástico; por si fuera poco, el agua y el viento arrastran desde la tierra más recipientes de plástico. Las desprevenidas tortugas de mar, gaviotas, marsopas, focas y ballenas confunden el plástico con alimento, por lo que muchos de estos animales mueren después de consumirlo. El petróleo contamina el océano abierto desde muchas fuentes, como los derrames de buques cisterna cargados de petróleo, el escurrimiento por eliminación incorrecta en tierra, las fugas de pozos petroleros marinos y la filtración natural. El río Mississippi transporta sedimentos cargados de nutrimentos de los fertilizantes que contienen nitrógeno y los vierte en el golfo de México, donde propician el crecimiento excesivo de fitoplancton. El plancton muere, se hunde en el lecho marino y provee un festín para las bacterias descomponedoras que agotan el oxígeno de las profundidades marinas. Durante los meses calurosos, esto crea en el fondo del mar una *zona muerta*, donde la comunidad marina casi se ha extinguido por completo. La zona muerta amenaza tanto a la comunidad ecológica local como a la industria de la pesca que depende de la salud del ecosistema. Zonas muertas similares se están desarrollando en las aguas costeras de todo el mundo.

La creciente demanda de pescado para alimentar a una población humana en aumento, aunada a las tecnologías pesqueras cada vez más eficientes, ha provocado la pesca excesiva no sustentable (véase el capítulo 30). Las poblaciones de bacalao del este de Canadá, algunas vez abundantes, actualmente casi se han extinguido, a pesar de que hace más de una década se impusieron severas restricciones a la pesca; es probable que la explotación pesquera del bacalao en Nueva Inglaterra siga el mismo destino. Las poblaciones de abadejo, pez espada, atún y muchos tipos de mariscos también han disminuido espectacularmente como resultado de la pesca excesiva. El dragado en busca de peces, vieiras y cangrejos no sólo ha agotado muchas de estas poblaciones, sino que también daña los ecosistemas del lecho marino al perjudicar a muchas otras especies. Las poblaciones de tiburones han disminuido drásticamente y ahora muchas de ellas están en peligro de extinción a causa de la sobreexplotación. Estos depredadores de lento crecimiento son especies clave en las redes alimentarias del océano. Puesto que muchos tipos de tiburones no se reproducen sino hasta que llegan a los 10 años o más de vida y engendran unos cuantos descendientes, sus poblaciones se recuperan muy lentamente.

Por todo el mundo se han establecido cada vez más reservas marinas, lo que impulsa mejoras sustanciales en la diversidad, el número y el tamaño de animales marinos dentro de estas áreas. Las zonas cercanas se benefician porque las reser-

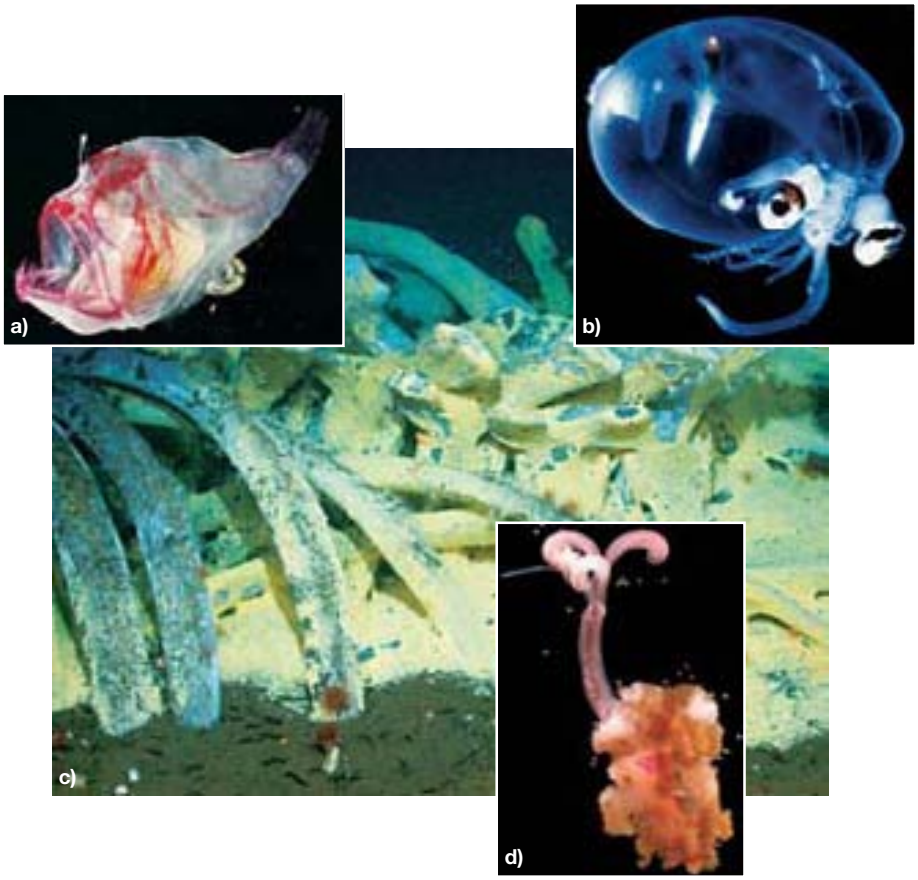


FIGURA 29-32 Habitantes de las profundidades

Un pez víbora, cuyas enormes mandíbulas y filosos dientes le permiten atrapar y tragar a su presa completa, seduce a sus víctimas con su atractiva luminiscencia. ***b)*** Un calamar de las profundidades del océano. ***c)*** El esqueleto de una ballena constituye una enorme fuente de nutrimentos en el fondo del mar. d) Un "gusano zombi" puede insertar la parte inferior de su cuerpo, con forma de raíz, profundamente en los huesos del cadáver en descomposición de la ballena.

vas actúan como guarderías que ayudan a restaurar las poblaciones fuera de la reserva. Muchos países han establecido límites máximos a la pesca de tiburones y de otras poblaciones amenazadas de peces, en tanto que el dragado se prohibió recientemente en la costa occidental de Estados Unidos para proteger a las comunidades marinas. El cultivo de peces, o *acuicultura,* también puede ayudar a satisfacer la demanda de ciertos tipos de peces y mariscos, como el camarón y el salmón, pero las granjas de peces y camarones deben planearse y administrarse cuidadosamente para no perjudicar los ecosistemas locales.

Comunidades únicas cubren el lecho oceánico

Comunidades en las profundidades del océano

FIGURA 29-32). En esa zona, muchos animales generan su propia luz utilizando complejas vías metabólicas que liberan energía lumínica, un fenómeno conocido como bioluminiscencia. Algunos peces mantienen colonias de bacterias bioluminiscentes en visibles cámaras especiales en sus cuerpos. La bioluminiscencia ayuda a los habitantes del fondo marino a ver (muchos de ellos tienen enormes ojos), a atraer a sus presas (figura 29-32a), o bien, a sus parejas. Poco se sabe acerca del comportamiento y la ecología de estas criaturas sorprendentes y exóticas, que nunca sobreviven si se les trae a la superficie marina.

Recientemente se han encontrado comunidades enteras —incluidas especies nuevas para la ciencia— que se alimentan de cadáveres de ballenas, cada una de las cuales provee unas 40 toneladas en promedio de alimento al lecho oceánico (figura 29-32c). Primero, los peces y los cangrejos se encargan de despojar al cadáver de los músculos y la grasa; luego, densas masas de gusanos, almejas y caracoles se abarrotan sobre el enorme esqueleto para extraer las grasas almacenadas en los huesos. Los cuerpos de los "gusanos zombi" comedores de huesos, descritos por primera vez en 2005, están formados principalmente de estructuras con forma de raíces que perforan los huesos, una estrategia alimentaria nunca antes observada (figura 29-32d). Las bacterias anaeróbicas continúan después con la descomposición de los huesos, y una comunidad sumamente diversa de almejas, gusanos, mejillones y crustáceos se moviliza para alimentarse de las bacterias presentes en ese estado de descomposición, que bien puede durar varias décadas.

Comunidades de las chimeneas hidrotermales

En 1977 los geólogos que exploraban la fisura de las Galápagos (una zona del lecho del Pacífico donde las placas que forman la corteza terrestre se están separando) encontraron unas chimeneas que arrojaban agua sobrecalentada y ennegrecida por su contenido de azufre y minerales. En torno a estas chimeneas había una rica **comunidad hidrotermal** de peces rosados, cangrejos blancos ciegos, enormes mejillones, almejas blancas, anémonas de mar, gusanos tubulares gigantes y caracoles que portaban armazones cubiertos de placas de hierro (FIGURA 29-33). Se han encontrado cientos de nuevas especies en estos hábitat especializados y que ahora se han descubierto en muchas regiones de las profundidades del mar donde las placas tectónicas se están separando, permitiendo la expulsión de material del interior de la Tierra.

En este singular ecosistema las bacterias sulfurosas son los productores primarios. Estas bacterias obtienen energía de una fuente insólita que es mortífera para casi todas las demás formas de vida: el sulfuro de hidrógeno que sale de las grietas de la corteza terrestre. Este proceso, llamado *quimiosíntesis*, ocupa el lugar de la fotosíntesis en estas comunidades de chi-

FIGURA 29-33 Comunidades de las chimeneas hidrotermales Las "chimeneas negras" arrojan agua sumamente caliente rica en minerales que proveen tanto energía como nutrimentos a la comunidad de los respiraderos. Los gusanos rojos tubulares gigantes de casi 3 metros de largo llegan a vivir 250 años. Algunas partes de estos gusanos son de color rojo por la hemoglobina captadora de sulfuro de hidrógeno. (**Imagen en recuadro**) El pie de este caracol de la comunidad hidrotermal está protegido por escamas recubiertas con sulfuro de hierro.

meneas, que prosperan a casi dos kilómetros por debajo de la superficie del océano. Muchos animales de las chimeneas consumen los microorganismos directamente; otros, como el gusano tubular gigante (que carece de tracto digestivo), alojan las bacterias en órganos especiales de su cuerpo y obtienen de ellas toda la energía que necesitan. El gusano, que llega a alcanzar una longitud de casi tres metros, debe su color rojo a una forma especial de hemoglobina que transporta sulfuro de hidrógeno a las bacterias simbióticas. Estos gusanos tubulares ostentan el récord de longevidad entre los invertebrados: la asombrosa cantidad de 250 años.

Las bacterias y las arqueas que habitan en las comunidades de las chimeneas tienen el récord de supervivencia a temperaturas elevadas. Algunas sobreviven en agua a temperaturas de hasta 120°C (248°F); a esta profundidad el agua alcanza temperaturas muy por encima de la ebullición debido a la enorme presión. Los científicos investigan cómo se las arreglan las enzimas y demás proteínas de estos microbios amantes del calor para continuar funcionando a temperaturas que destruirían las proteínas de nuestro cuerpo; también indagan formas de dar algún uso comercial a estas asombrosas proteínas.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ALAS DE ESPERANZA

La selva de Arabuko-Sokoke continúa amenazada por los ocupantes ilegales que desean desmontar los terrenos y establecer viviendas dentro de sus confines. Sin embargo, donde los agricultores recolectan sus mariposas, la selva padece mucho menos cacería furtiva, porque ahora aquéllos denuncian a los cazadores furtivos en vez de sumarse a ellos. Luego de varios años de vigilancia, el director del proyecto, Ian Gordon, no ve indicios de que las poblaciones de mariposas se estén reduciendo. Con el estómago lleno y dinero para adquirir algunos pequeños lujos, ahora la gente cuenta con los medios para apoyar la filosofía de uno de los ancianos de la aldea, quien afirma: "La selva está aquí, nosotros la encontramos aquí, y aquí debemos dejarla para la generación de nuestros hijos."

Piensa en esto Casi todos los promotores de la conservación coinciden en que "colocar cercas e imponer multas" no es la forma más adecuada de preservar un hábitat; los residentes de la localidad deben respaldar y participar activamente en su conservación. Elabora o investiga otros proyectos que se ajusten al modelo de uso sustentable de las selvas tropicales o de otros ecosistemas en peligro, como los arrecifes de coral.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

29.1 ¿Qué factores influyen en el clima de la Tierra?

La disponibilidad de luz solar, agua y temperaturas idóneas determina el clima de una región determinada. La luz solar mantiene la temperatura de la Tierra. Cantidades iguales de energía solar se distribuyen sobre una superficie más reducida en el ecuador que más al norte o al sur; por esta razón, el ecuador es relativamente caluroso, en tanto que las latitudes mayores, en general, registran temperaturas más bajas. La inclinación de la Tierra sobre su eje de rotación produce grandes variaciones estacionales en las latitudes septentrionales y meridionales.

La elevación del aire caliente y el descenso del aire frío de acuerdo con regímenes regulares de norte a sur generan zonas de poca y mucha humedad. La topografía de los continentes y las corrientes oceánicas modifican estos regímenes.

Web tutorial 29.1 Circulación tropical atmosférica y clima global

29.2 ¿Qué condiciones son necesarias para la vida?

Para que haya vida en la Tierra se necesitan nutrimentos, energía, agua líquida y una temperatura razonable. Las diferencias en cuanto a la forma y abundancia de los seres vivos en diversas partes del planeta son atribuibles en buena parte a diferencias en la influencia recíproca de estos cuatro factores.

29.3 ¿Cómo se distribuye la vida en la tierra?

En tierra, los factores limitantes fundamentales son la temperatura y el agua líquida. Las regiones grandes de los continentes cuyo clima es semejante tienen una vegetación similar, determinada por la interacción de la temperatura y la precipitación pluvial o la disponibilidad de agua. Estas regiones reciben el nombre de biomas.

Los biomas de selva tropical, situados cerca del ecuador, son calurosos y húmedos y en ellos predominan enormes árboles de hojas anchas y perennes. La mayor parte de los nutrimentos están vinculados a la vegetación y casi toda la vida animal es arbórea. Las selvas tropicales, donde habitan al menos el 50 por ciento de todas las especies, están siendo taladas rápidamente con fines agrícolas, pese a que el suelo es sumamente pobre.

La sabana africana es un extenso pastizal con pronunciadas estaciones secas y lluviosas. Es el hogar de las manadas de grandes mamíferos más variadas y extensas del planeta.

En su mayoría, los desiertos, que reciben menos de 250 mm de lluvia, están situados entre los 20 y los 30° de latitud norte y sur, y en las sombras orográficas de las cordilleras. En los desiertos las plantas están muy separadas unas de otras y tienen adaptaciones que les permiten conservar el agua. Los animales tienen mecanismos conductuales y fisiológicos que les ayudan a conservar el agua y a evitar el calor excesivo.

El chaparral existe en condiciones semejantes a las de los desiertos, aunque moderadas por su proximidad a un litoral, lo que permite que árboles pequeños y arbustos prosperen. Los pastizales, concentrados en el centro de los continentes, tienen una cubierta continua de pasto y, en buena parte, han sido convertidos en terrenos agrícolas.

Los bosques caducifolios de clima templado, cuyos árboles pierden sus hojas en invierno para conservar la humedad, predominan en la mitad oriental de Estados Unidos y también están presentes en Europa occidental y Asia oriental. En estos bosques hay más precipitación pluvial que en los pastizales. En la costa norte del Pacífico de Estados Unidos hay bosques de clima templado lluvioso, en los que predominan los árboles de hojas perennes. La taiga, o bosque septentrional de coníferas, cubre gran parte del norte de Estados Unidos, sur de Canadá y Eurasia septentrional. En ella predominan las coníferas, cuyas pequeñas agujas cerosas están adaptadas para conservar el agua y llevar a cabo la fotosíntesis durante todo el año.

La tundra es un desierto helado en el que el *permafrost* impide el crecimiento de árboles y donde los arbustos alcanzan poca altura. No obstante, en este frágil bioma, que se encuentra en las cumbres de las montañas y en el Ártico, proliferan gran variedad de animales y plantas perennes.

29.4 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio acuático?

La energía y los nutrimentos son los principales factores limitantes de la distribución y abundancia de seres vivos en los ecosistemas acuáticos. Se encuentran nutrimentos en los sedimentos del fondo, los cuales han sido arrastrados desde los terrenos circundantes y concentrados cerca de la ribera y en aguas profundas.

En los lagos de agua dulce la zona litoral, cercana a la ribera, recibe energía solar y es rica en nutrimentos, por lo que sostiene una comunidad muy variada. La zona limnética es la región iluminada de las aguas abiertas donde se puede llevar a cabo la fotosíntesis. La zona profunda son las aguas situadas a mayor profundidad, donde la luz es insuficiente para efectuar la fotosíntesis y la comunidad está dominada por organismos heterótrofos. Los lagos oligotróficos son transparentes y pobres en nutrimentos y las comunidades que sostienen son escasas. Los lagos eutróficos son ricos en nutrimentos y brindan sustento a densas comunidades. Durante la sucesión a terreno seco, los lagos tienden a pasar de una condición oligotrófica a una eutrófica.

Las corrientes comienzan en una región fuente, a menudo en las montañas, donde el agua de lluvia y la nieve las alimenta. Por lo general, el agua que sirve de fuente es clara, con elevadas concentraciones de oxígeno y baja en nutrimentos. Las corrientes se unen a menores alturas, transportando sedimentos de la tierra y dando sostén a una comunidad más grande en esta región de transición, donde se forman los ríos. En su tránsito hacia los lagos o los océanos, los ríos entran en llanuras de aluvión relativamente planas donde depositan nutrimentos, toman una trayectoria sinuosa y se extienden sobre el terreno cuando la precipitación es abundante.

La mayor parte de la vida de los océanos habita en aguas poco profundas, donde la luz solar puede penetrar, y se concentra cerca de los continentes y en las zonas de surgencia, donde los nutrimentos son más abundantes. Las aguas costeras, que comprenden la zona intermareas y la zona costera cercana, contienen la mayor abundancia de vida. Los productores son plantas acuáticas fijas en el fondo y protistas fotosintetizadores que reciben el nombre colectivo de fitoplancton. Los arrecifes de coral existen sólo en los mares cálidos y poco profundos. Los arrecifes de carbonato de calcio constituyen un hábitat complejo que sostiene el ecosistema submarino más variado, el cual peligra por el limo, la pesca excesiva y el calentamiento global.

En el océano abierto la mayor cantidad de vida se encuentra en la zona fótica, donde la luz sostiene el fitoplancton. En la zona afótica, más profunda, los seres vivos se sostienen de los nutrimentos que caen de la zona fótica. Muchas especies oceánicas han sido sobreexplotadas.

El océano profundo es oscuro, y muchas de las especies que ahí habitan son bioluminiscentes y están adaptadas a la fuerte presión del agua. Los cadáveres de las ballenas proveen nutrimentos en abundancia que permiten una sucesión de comunidades únicas durante varias décadas. Unas comunidades de chimeneas especializadas, sostenidas por bacterias quimiosintéticas, prosperan a gran profundidad en las aguas sobrecalentadas que brotan donde las placas de la corteza terrestre se están separando.

TÉRMINOS CLAVE

arrecife de coral *pág. 603*
biodiversidad *pág. 588*
bioma *pág. 587*
bosque caducifolio de clima templado *pág. 595*
bosque de clima templado lluvioso *pág. 596*
bosque septentrional de coníferas *pág. 596*
bosque tropical caducifolio *pág. 590*
capa de ozono *pág. 586*
clima *pág. 582*
comunidad de la chimenea hidrotermal *pág. 606*
chaparral *pág. 593*
desierto *pág. 592*
El Niño *pág. 584*
estado del tiempo *pág. 582*
estuario *pág. 600*
fitoplancton *pág. 599*
giro *pág. 584*
La Niña *pág. 585*
lago eutrófico *pág. 599*
lago oligotrófico *pág. 599*
pastizal *pág. 594*
pelágica *pág. 605*
permafrost *pág. 598*
plancton *pág. 599*
pradera *pág. 594*
sabana *pág. 590*
selva tropical *pág. 587*
sombra orográfica *pág. 584*
surgencia *pág. 601*
taiga *pág. 596*
tundra *pág. 597*
zona afótica *pág. 601*
zona costera cercana *pág. 602*
zona fótica *pág. 601*
zona intermareas *pág. 601*
zona limnética *pág. 599*
zona litoral *pág. 598*
zona profunda *pág. 599*
zooplancton *pág. 599*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Explica cómo contribuyen las corrientes de aire a la formación del trópico y de los grandes desiertos.
2. ¿Qué nombre reciben las grandes corrientes oceánicas de forma aproximadamente circular? ¿Qué efecto tienen en el clima y dónde es más intenso ese efecto?
3. ¿Cuáles son los cuatro requisitos principales para la existencia de vida? ¿Cuáles son los dos que con mayor frecuencia son limitantes en los ecosistemas terrestres? ¿Y en los ecosistemas oceánicos?
4. Explica por qué al ascender por una montaña se observan biomas similares a los que encontraríamos al recorrer una gran distancia hacia el norte.
5. ¿Dónde se concentran los nutrimentos del bioma de selva tropical? ¿Por qué la vida de la selva tropical se concentra a gran altura sobre el suelo?
6. Explica dos efectos indeseables de la agricultura en el bioma de selva tropical.
7. Cita algunas de las adaptaciones de *a*) las plantas del desierto y *b*) los animales del desierto al calor y la sequía.
8. ¿Qué actividades humanas perjudican a los desiertos? ¿Qué es la desertificación?
9. ¿Cómo se han adaptado los árboles de la taiga a la falta de agua y a la brevedad de la temporada de crecimiento?
10. ¿En qué difieren los biomas de árboles caducifolios y de coníferas?
11. ¿Qué factor ambiental individual es el que mejor explica por qué hay praderas de pastos cortos en Colorado, praderas de pastos altos en Illinois y bosques caducifolios en Ohio?
12. ¿Dónde se encuentran las poblaciones más numerosas del mundo de grandes herbívoros y carnívoros?
13. ¿Dónde es más abundante la vida en los océanos y por qué?
14. ¿Por qué es tan grande la diversidad de la vida en los arrecifes de coral? ¿Qué influencias humanas constituyen una amenaza para ellos?
15. Explica la diferencia entre las zonas limnética, litoral y profunda de los lagos en términos de su ubicación y de las comunidades que sostienen.
16. Explica la diferencia entre los lagos oligotróficos y los eutróficos. Describe *a*) una situación hipotética natural y *b*) una situación hipotética creada por el hombre, en las que un lago oligotrófico podría transformarse en un lago eutrófico.
17. Compara las zonas fuente, de transición y llanura de aluvión de las corrientes y los ríos.
18. Explica la diferencia entre las zonas fótica y afótica. ¿Cómo obtienen nutrimentos los organismos de la zona fótica? ¿Cómo se obtienen nutrimentos en la zona afótica?
19. ¿Cuál es el productor primario insólito que constituye la base de las comunidades de las chimeneas hidrotermales?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿En qué bioma terrestre se encuentra tu escuela o universidad? Comenta acerca de las semejanzas y diferencias entre tu localidad y la descripción general de ese bioma en el texto. En la ciudad o población donde está ubicado el plantel en el que estudias, ¿cómo ha modificado la actividad humana las interacciones de la comunidad?
2. Durante las décadas de 1960 y 1970, en muchas partes de Estados Unidos y Canadá se prohibió el uso de detergentes con fosfatos. Hasta entonces, casi todos los detergentes de lavandería, así como muchos jabones y champús tenían altas concentraciones de fosfatos. ¿Qué preocupación ambiental motivó el establecimiento de estas prohibiciones y cuál ha sido el ecosistema más beneficiado por las prohibiciones?
3. En los países en desarrollo, donde aún se fabrican CFC, es común la venta ilegal de estos productos, lo que reducirá la rapidez de recuperación de la capa de ozono. ¿Qué medidas sugerirías tanto a los países industrializados como a aquellos en vías de desarrollo para reducir el uso ilegal de CFC?
4. Se espera que el calentamiento global vuelva más cálidas muchas zonas del planeta, pero también se espera que cambien los regímenes de lluvia, los cuales se volverán menos predecibles. ¿Por qué es especialmente importante predecir los cambios en los regímenes pluviales en las zonas tropicales?
5. Los bosques más septentrionales son mucho más capaces de regenerarse después de una tala que las selvas tropicales. Intenta explicar a qué se debe esto.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Burroughs, D. "On the Wings of Hope". *International Wildlife*, julio-agosto de 2000. Las mariposas de Kenia están salvando a un bosque singular y a sus habitantes; este artículo es la base de nuestro estudio de caso.

Falkowski, P. G. "The Ocean's Invisible Forest". *Scientific American*, agosto de 2002. Describe la productividad del fitoplancton y su importancia en la captación de dióxido de carbono; en este reportaje también se especula acerca de las repercusiones del calentamiento global.

Milius, S. "Decades of Dinner". *Science News*, 7 de mayo de 2005. El cadáver de una ballena da sustento a una comunidad única y cambiante del lecho oceánico durante varias décadas.

Myers, A. "Will the Class of 2003 Save the Cod?" *Blue Planet*, invierno/primavera 2006. La población de bacalao de Nueva Inglaterra está en serios problemas. La esperanza reside en reducir la pesca, de manera que los ejemplares más jóvenes logren alcanzar la edad reproductiva.

Pauly, D. y Watson, R. "Counting the Last Fish". *Scientific American* cadena alimentaria, por lo que también estas poblaciones están en peligro de extinción.

Pearce, F. "Forests Paying the Price for Biofuels". *New Scientist*, 22 de noviembre de 2005. Los combustibles biológicos no son "verdes" cuando las selvas tropicales son taladas y remplazadas por plantaciones de soya y palmeras para producir tales combustibles.

Raloff, J. "Clipping the Fin Trade". *Science News*, 12 de octubre de 2002. El reportaje documenta la pesca excesiva de tiburón, generalmente sólo para obtener sus aletas; también explica las dificultades que enfrentan las poblaciones de tiburones para recuperarse.

Schrope, M. "The Undiscovered Oceans". *New Scientist*, 12 de noviembre de 2005. Un mundo sin explorar de criaturas exóticas y diversas cubre buena parte de la Tierra.

Stolzenburg, W. "Understanding the Underdog". *Nature Conservancy*, otoño de 2004. Los perros de la pradera —diezmados por las actividades agrícolas y ganaderas, así como por el avance de la población humana sobre sus anteriores dominios— constituyen una especie clave de los pastizales en Estados Unidos.

CAPÍTULO 30

Conservación de la biodiversidad de la tierra

Representación de un artista del pájaro carpintero de pico color marfil.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: De regreso de la extinción

30.1 ¿Qué es la biodiversidad y por qué debemos cuidarla?

Servicios de los ecosistemas: usos prácticos para la biodiversidad

La economía ecológica reconoce el valor monetario de los servicios de los ecosistemas

30.2 ¿Está disminuyendo la biodiversidad de la Tierra?

La extinción es un proceso natural, pero las tasas se han elevado de forma alarmante

Guardián de la Tierra: Restauración de los Everglades

Cada vez es mayor el número de especies amenazadas por la extinción

30.3 ¿Cuáles son las principales amenazas contra la biodiversidad?

La humanidad está acabando con el "capital ecológico" de la Tierra

Guardián de la Tierra: Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva

Las actividades humanas amenazan la biodiversidad en varias formas importantes

Guardián de la Tierra: En defensa de las tortugas marinas

30.4 ¿Cómo puede ayudar la biología de la conservación a preservar la biodiversidad?

Fundamentos de la biología de la conservación

La biología de la conservación es una ciencia integrada

Preservación de los ecosistemas salvajes

Guardián de la Tierra: Recuperación de un depredador clave

30.5 ¿Por qué la sustentabilidad es la clave de la preservación?

La vida y el desarrollo sustentables estimulan el bienestar ecológico y de la humanidad a largo plazo

Las reservas de la biosfera ofrecen modelos para la conservación y el desarrollo sustentable

La agricultura sustentable ayuda a preservar las comunidades naturales

El futuro está en tus manos

Guardián de la Tierra: Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra

Enlaces con la vida: ¿Qué pueden hacer los individuos?

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO De regreso de la extinción

ESTUDIO DE CASO DE REGRESO DE LA EXTINCIÓN

"CUANDO TE LEVANTAS por la mañana, nunca sabes si ese día habrá algún acontecimiento que haga estremecer a la Tierra y cambie tu vida para siempre", escribió Tim Gallagher, un ornitólogo de la Universidad de Cornell. Para Gallagher, una serie de sucesos que transforman la vida comenzó cuando leyó en Internet cierta información de un aficionado a las travesías en kayak, quien había visto un pájaro grande en un lejano afluente en Arkansas. La descripción coincidía con la de un pájaro carpintero con pico color marfil, un ave que casi todo mundo creía extinta. Sin embargo, Gallagher nunca había perdido la esperanza de que en algún lugar este pájaro carpintero hubiera podido sobrevivir. Desde finales de la década de 1980, cuando se observaron algunas de estas aves en Cuba, no había ningún informe confiable acerca de la existencia de este pájaro carpintero en cualquier otra parte del mundo.

Nunca han abundado los pájaros carpinteros de pico color marfil. Una parte fundamental de su dieta consiste en larvas de escarabajos grandes que obtienen excavando la madera de los árboles muertos recientemente, pero que todavía se encuentran de pie en los bosques madereros caducos. Estos bosques en algún tiempo cubrieron extensas regiones del sudeste de Estados Unidos, y los pájaros carpinteros se veían desde Carolina del Norte hasta los estados de Florida y Louisiana y el este de Texas. Pero durante el siglo pasado la tala eliminó la mayor parte de los hábitat en esos magníficos bosques, junto con el alimento más importante de los pájaros carpinteros de pico color marfil. La última vez que se vio a esta ave en Estados Unidos fue en 1944; era una hembra que se encontraba en los vestigios de un terreno desmontado de un viejo bosque en Louisiana. Éste era el único hábitat de ese tipo que quedaba en el sur, y era el hogar de la única población documentada de pájaros carpinteros de pico color marfil en Estados Unidos. El bosque fue talado a pesar de la oposición de la gente y de la oferta hecha al gobierno de Louisiana por la sociedad de Audubon para comprar el terreno. Durante los siguientes 60 años todavía había grandes esperanzas de que se suspendiera la tala. Entonces, en el año 2005, los ornitólogos y los amantes de las aves se asombraron y conmovieron cuando la revista *Science* publicó un artículo de John Fitzpatrick, Tim Gallagher y otros ornitólogos, en el que describían el redescubrimiento del pájaro carpintero de pico color marfil. Se había localizado varias veces a un pájaro carpintero macho en el Refugio Nacional del río Cache, en Arkansas.

Esta observación, calificada como "milagrosa", coronó 20 años de esfuerzos de la organización "The Nature Conservancy" para proteger y restaurar 485 kilómetros cuadrados de una región llamada Big Woods. Esta región de pantanos, ríos y bosques madereros está ubicada en las llanuras aluviales del río Mississippi. Desde que se observó esta ave, la organización The Nature Conservancy y el laboratorio de ornitología de la Universidad de Cornell lograron reunir varios millones de dólares para preservar unos 800 kilómetros cuadrados de bosques y ríos de esta región durante la siguiente década. El pájaro carpintero de pico color marfil ya se habría extinguido a no ser por los exitosos esfuerzos para conservar lo que quedaba de su hábitat original.

¿Se evitará la extinción de este pájaro carpintero de pico color marfil? ¿Existe todavía más de un ejemplar? ¿Los observadores aficionados de pájaros, ansiosos de ver alguna de estas aves, invadirán su último refugio y de forma inadvertida "amarán a este pájaro carpintero hasta su muerte"?

Los especialistas en conservación tratan de aplicar los principios de la biología, en particular de la ecología, la genética y la biología evolucionista, para mejorar el bienestar y mantener la diversidad de la vida sobre la Tierra. Los biólogos empeñados en la conservación de la naturaleza también trabajan estrechamente con políticos, abogados, geógrafos, economistas, historiadores y especialistas en ética, porque la preservación es necesariamente un asunto de interés social. La meta de la **biología de la conservación** es preservar la diversidad de los organismos vivos, tanto por el bien de éstos como por los beneficios que la diversidad biológica representa para la humanidad.

30.1 ¿QUÉ ES LA BIODIVERSIDAD Y POR QUÉ DEBEMOS CUIDARLA?

La **biodiversidad** es simplemente la variedad de la vida: la asombrosa diversidad de los organismos vivos, sus genes, los ecosistemas de los cuales forman parte y las interacciones entre ellos. La biología de la conservación busca preservar la diversidad de las especies y la diversidad genética dentro de cada una de éstas, así como preservar todos los ecosistemas y las complejas interacciones de las comunidades dentro de ellos.

La biología de la conservación debe operar en el nivel de las especies, las poblaciones y la comunidad. Cada especie es única e irremplazable. Aunque las extinciones ocurren de forma natural a través del tiempo evolutivo, la biología de la conservación trata de evitar las extinciones causadas por las actividades humanas. Dentro de cada especie, la diversidad genética produce adaptaciones ligeramente diferentes entre los individuos, lo que permite a las especies prosperar en una gama de ambientes y evolucionar en respuesta a las condiciones cambiantes. Deben conservarse poblaciones razonablemente grandes para preservar la adecuada diversidad genética dentro de una especie (véase el capítulo 15). Finalmente, la intrincada red de las interacciones comunitarias es crucial para mantener el funcionamiento adecuado de los ecosistemas, los cuales, a la vez, sostienen la salud, el bienestar y, en última instancia, la supervivencia de los seres humanos.

Servicios de los ecosistemas: Usos prácticos para la biodiversidad

Muchos de nosotros trabajamos y vivimos en ciudades, nuestros alimentos vienen empacados o envasados y los adquirimos en el supermercado; a menudo transcurren semanas sin que veamos un ecosistema en su estado natural. ¿Por qué entonces debemos preocuparnos por conservar los ecosistemas y las comunidades que sostienen? Muchos dirán que vale la pena preservar los ecosistemas por el propio bien de éstos. Una razón inmediata más práctica es el interés propio; estos ecosistemas, tanto directa como indirectamente, nos sostienen (FIGURA 30-1).

En décadas recientes, los científicos, economistas y políticos han admitido que la naturaleza nos brinda beneficios gratuitos, pero que generalmente no los reconocemos. Estos **servicios de los ecosistemas** son los procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y sus comunidades vivas sostienen y satisfacen la vida humana. Los servicios de los ecosistemas incluyen purificar el aire y el agua, reponer el oxígeno, polinizar las plantas y dispersar sus semillas, ofrecer un hábitat adecuado para la vida silvestre, descomponer los desechos, controlar la erosión y las inundaciones, controlar las plagas y ofrecer medios recreativos. Estos servicios literalmente no tienen precio porque mantienen a la humanidad, pero como se nos ofrecen de forma gratuita y su valor económico es difícil de calcular, los servicios de los ecosistemas casi siempre son ignorados. Cuando los terrenos se destinan para la vivienda, por ejemplo, generalmente no hay incentivo para que los responsables de la obra preserven los ecosistemas y sus servicios, sino que, por el contrario, existe una considerable motivación económica para destruirlos. La gente casi nunca ha intentado sopesar los costos verdaderos en relación con los beneficios económicos de alterar el ambiente.

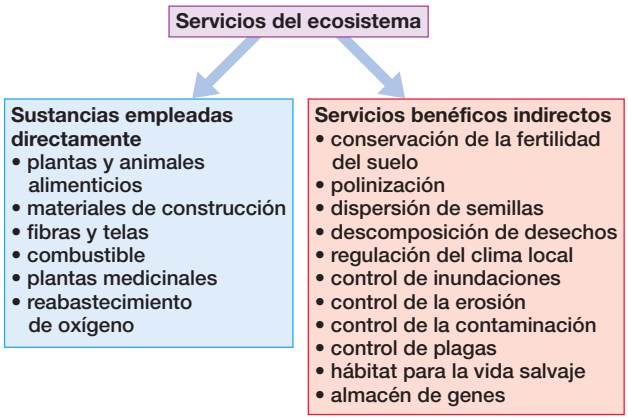

Servicios del ecosistema
Sustancias empleadas directamente
• plantas y animales alimenticios
• materiales de construcción
• fibras y telas
• combustible
• plantas medicinales
• reabastecimiento de oxígeno
Servicios benéficos indirectos
• conservación de la fertilidad del suelo
• polinización
• dispersión de semillas
• descomposición de desechos
• regulación del clima local
• control de inundaciones
• control de la erosión
• control de la contaminación
• control de plagas
• hábitat para la vida salvaje
• almacén de genes

FIGURA 30-1 Servicios del ecosistema

En 2005 se publicó el informe *Millennium Ecosystem Assessment* (*Evaluación del ecosistema del milenio*), el cual es el resultado de cuatro años de esfuerzo desplegado por más de 1300 científicos de 95 países para recabar la información más fidedigna acerca de los ecosistemas del mundo. El informe concluye que el 60 por ciento de todos los servicios de los ecosistemas de la Tierra se estaban degradando o estaban utilizándose de una manera no sustentable. Estos resultados subrayan la necesidad de preservar los ecosistemas naturales que todavía quedan en la Tierra y de trabajar para restaurar los que se han dañado.

La gente usa directamente algunos productos de los ecosistemas

Los ecosistemas sanos proveen directamente a los seres humanos una gran variedad de recursos. Casi cualquiera puede comprar peces y mariscos recién capturados, que sólo prosperan en los medios marinos sanos. La práctica de la cacería como deporte y para obtener alimento es importante para la economía de muchas regiones rurales. En África la mayoría de los animales salvajes son cazados para obtener alimento, y brindan una fuente importante de proteínas para las poblaciones en crecimiento, a menudo mal nutridas (véase la sección "Guardián de la Tierra: Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva"). En muchos países en desarrollo, los residentes rurales dependen de la madera de los bosques de la localidad para hacer fuego y cocinar sus alimentos.

FIGURA 30-2 Vainas de las semillas del anís estrella

Las selvas tropicales suministran valiosas maderas como la teca, que se consume a nivel mundial. Los medicamentos tradicionales que consume el 80 por ciento de la población del mundo se obtienen principalmente de las plantas. Aproximadamente el 25 por ciento de los medicamentos que se venden con receta médica contienen ingredientes activos que se extraen, o que originalmente se extraían, de las plantas. El medicamento antiviral Tamiflu está compuesto por una sustancia química extraída de las vainas de las semillas del anís estrella chino (FIGURA 30-2). Los científicos que investigan el cáncer están muy entusiasmados con un compuesto aislado de una planta que crece en las selvas tropicales de Sudamérica (*Forsteronia refracta*) que inhibe el crecimiento de las células cancerígenas de las glándulas mamarias, pero no de las células normales cultivadas en el laboratorio.

Los servicios de los ecosistemas también benefician a la gente de manera indirecta

Los servicios indirectos que brindan los diversos ecosistemas sanos son de gran alcance y contribuyen de manera fundamental al bienestar humano, más que los productos cosechados directamente de la naturaleza. A continuación se describen unos cuantos ejemplos importantes.

Formación de suelos
Puede tomar cientos de años formar unos 2.5 centímetros de suelo. Los suelos ricos de los estados de la región central norte de Estados Unidos se acumularon bajo praderas naturales durante miles de años. Las labores de cultivo han convertido estos pastizales en una de las regiones agrícolas más productivas del mundo.

El suelo, con su diversidad de comunidades de organismos descomponedores y comedores de detritos (bacterias, hongos, lombrices y muchos insectos, entre otros), juega un papel fundamental en la desintegración de los desechos y en el reciclado de los nutrimentos. La gente depende de los suelos para la desintegración de los productos de desecho de la industria, de las aguas negras, de la agricultura y de los bosques. Así, el suelo desempeña algunas de las mismas funciones que una planta purificadora de agua. Las comunidades que habitan en el suelo también son cruciales para todos los ciclos de los nutrimentos. Por ejemplo, las bacterias que fijan el nitrógeno en el suelo convierten el nitrógeno atmosférico en una forma que pueden utilizar las plantas.

Control de la erosión y las inundaciones
Las plantas forman una barrera contra el viento que arrasa el suelo. Sus raíces estabilizan los suelos y aumentan su capacidad para retener el agua, lo que disminuye la erosión y las inundaciones. Las inundaciones masivas de 1993 a lo largo del río Missouri en Estados Unidos fueron el resultado, en parte, de la conversión de los bosques naturales, pantanos y pastizales de las riberas en tierras de cultivo. Esto incrementó considerablemente los escurrimientos y la erosión del suelo como resultado de las intensas lluvias (FIGURA 30-3a).

Los ecosistemas de las tierras húmedas (pantanos), además de su inmenso valor como hábitat para la vida animal, actúan como enormes esponjas que absorben el agua de las tormentas. También amortiguan el impacto de las olas que golpean la línea costera. La catastrófica inundación de Nueva Orleáns durante el huracán Katrina en agosto de 2005 fue un recordatorio desagradable del valor de las tierras húmedas costeras y de las consecuencias de su destrucción. En su estado natural, las aguas cargadas de limo del río Mississippi reabastecían los pantanos con sedimento y fortalecían una serie de islas adyacentes que servían como una barrera natural ante la fuerza de las tormentas. Ahora, como las aguas del Mississippi han sido degradadas, contenidas y desviadas, ya no sustentan estos ecosistemas naturales; el sur de Louisiana ha perdido 2600 kilómetros cuadrados de pantanos en los últimos 50 años. Los grandes diques (construidos a un costo enorme para remplazar los servicios del ecosistema que anteriormente se recibían de manera gratuita) sustituyen temporalmente la protección que brindaban los pantanos; entonces se presentó Katrina y rompió los diques causando inundaciones en el 80 por ciento de la ciudad (FIGURA 30-3b).

Regulación del clima
Al brindar sombra, reducir la temperatura y servir como rompevientos que disminuyen la evaporación, las comunidades de plantas tienen un efecto primordial sobre los climas locales. Los bosques influyen de manera importante en el ciclo del agua, al devolverla a la atmósfera por medio de la transpiración (o evaporación a través de las hojas). En las selvas tropicales del Amazonas, de un tercio a la mitad de la cantidad de lluvia consiste en agua transpirada por las hojas. La tala de

a) b)

FIGURA 30-3 Pérdida de los servicios de control de inundaciones
a) La transformación de los ecosistemas naturales para la agricultura contribuyó a las inundaciones del río Missouri luego de las intensas lluvias de 1993.

vastas zonas selváticas ocasiona que el clima local se vuelva más caliente y seco; esto dificulta que el ecosistema se regenere y daña también a otras selvas cercanas.

Los árboles también afectan el clima global, porque absorben el dióxido de carbono de la atmósfera y lo almacenan en sus troncos, raíces y ramas. El 20 por ciento del dióxido de carbono producido por las actividades humanas es resultado de la deforestación; a medida que los árboles se queman o descomponen, liberan CO_2, el cual contribuye al calentamiento global.

Recursos genéticos

Las plantas de cultivo, como el maíz, el trigo y los manzanos, tienen ancestros silvestres que los humanos han cultivado de manera selectiva durante siglos para producir alimentos. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el 75 por ciento del alimento de la humanidad proviene tan sólo de 12 cultivos. Podría aprovecharse un mayor número de plantas silvestres como fuentes de alimento, ya que muchas son más nutritivas y se adaptan mejor a una variedad de condiciones de crecimiento. Los investigadores han identificado genes en las plantas silvestres que podrían ser transferidos a los cultivos para incrementar la productividad y brindar mayor resistencia a las enfermedades, las sequías y a la acumulación de sal en los terrenos irrigados. Por ejemplo, algunos parientes silvestres del trigo tienen una tolerancia considerable a la sal, y los investigadores están trabajando para transferir al trigo doméstico los genes que confieren a estas plantas silvestres la capacidad para vivir en agua salada. Los climas y suelos de muchos paises en desarrollo no son los adecuados para las plantas alimenticias que crecen con éxito en las naciones industrializadas. Puesto que los científicos apenas han empezado a explorar el tesoro genético que representa la biodiversidad, éste promete convertirse en un recurso cada vez más importante en el futuro, pero siempre y cuando se preserve.

Recreación

Mucha gente, quizá la mayoría, experimenta gran placer al "volver a la naturaleza". Cada año en Estados Unidos, cerca de 350 millones de personas visitan los terrenos públicos protegidos, como los parques nacionales y los santuarios de la vida silvestre. Las pequeñas poblaciones en Arkansas, cerca de la reserva Big Woods, esperan que su economía se revitalice con los ingresos provenientes de los turistas atraídos por el descubrimiento del pájaro carpintero de pico color marfil. En muchas áreas rurales, la economía local depende del dinero que gastan los visitantes que van a caminar, acampar, cazar, pescar o fotografiar la naturaleza.

El ecoturismo, que permite a la gente observar comunidades biológicas únicas, es una industria de rápido crecimiento a nivel mundial. Ejemplos de los destinos ecoturísticos incluyen los arrecifes de coral y las selvas tropicales, las islas Galápagos, la sabana africana y también la Antártida (**FIGURA 30-4**).

La economía ecológica reconoce el valor monetario de los servicios de los ecosistemas

La relativamente nueva disciplina llamada *economía ecológica* intenta asignar valores a los servicios de los ecosistemas y evaluar los cambios que ocurren cuando los ecosistemas naturales resultan dañados para abrir camino a las actividades humanas que generan dinero. Consideremos un proyecto que sugiere drenar los pantanos para irrigar los sembradíos. Si la pérdida de beneficios obtenidos de los pantanos (neutralización de contaminantes, control de las inundaciones, brindar un hábitat adecuado para la reproducción de peces, aves y muchos otros animales) se tomara en cuenta al decidir, la gente concluiría que los pantanos son más valiosos que los sembradíos. En la sección "Guardián de la Tierra: Restauración de los Everglades" se describe un proyecto masivo y costoso para anular la manipulación humana del ecosistema de pantanos más extenso de Estados Unidos.

Una forma de ponderar el valor económico de los servicios de un ecosistema es calcular el costo de los desastres que los ecosistemas naturales pudieron haber evitado o disminuido, si no se les hubiera alterado. Por ejemplo, la inundación de 1993 a lo largo del río Missouri (véase la figura 30-3a) ocasionó daños estimados en $12 mil millones, muchos de los cuales pudieron haberse evitado si se hubiera optado por un uso apropiado de los terrenos en décadas pasadas. Estas pérdidas resultaron mínimas en comparación con los $100 mil millones necesarios para restaurar Nueva Orleáns de los daños causados por las inundaciones que provocó el huracán Katrina, lo cual, con toda certeza, se habría reducido considerablemente si la gente no hubiera alterado la corriente del río Mississippi (véase la figura 30-3b).

Las utilidades que se obtienen por la destrucción de los ecosistemas van a dar a unos cuantos individuos, pero los costos repercuten en toda la sociedad; por esa razón, las entidades

b) c)

FIGURA 30-4 Ecoturismo
El ecoturismo administrado cuidadosamente representa un uso sustentable de los ecosistemas naturales, al tiempo que genera ingresos sin dañar el ambiente. ***a)*** Investigación en un arrecife de coral en las islas Fidji. Se advierte a los visitantes que no toquen el coral para que éste no se dañe.

a)

b)

FIGURA 30-5 Grandes mamíferos descubiertos recientemente
a) El elusivo kipunji africano fue descubierto en la selva tropical africana que está desapareciendo rápidamente. ***b)*** El tímido delfín australiano de nariz respingona.

gubernamentales deben participar más en la planeación para que funcione la economía ecológica. El costo de las inundaciones catastróficas, que recae en los contribuyentes de un país, es un reflejo de nuestro fracaso en la comprensión del valor de los servicios de los ecosistemas y en la planeación del desarrollo de una forma sustentable. ¿Se aplicarán estas lecciones en la reconstrucción de Nueva Orleáns? Sólo el tiempo lo dirá.

Un excelente ejemplo de la planeación gubernamental para preservar los servicios de los ecosistemas proviene de la ciudad de Nueva York, la cual obtiene la mayor parte de su agua de las cercanas montañas Catskill. Los bosques, las praderas y los suelos purifican el agua y abastecen a la ciudad de Nueva York con casi la mitad de su agua potable, clasificada alguna vez como la más pura de la nación. En 1997, al percatarse de que el agua potable se estaba contaminando con las aguas negras y los escurrimientos agrícolas a medida que se iban urbanizando las montañas Catskill, los funcionarios de la ciudad calcularon que costaría de $6 mil a $8 mil millones construir una planta purificadora de agua, más unos $300 millones adicionales al año para mantenerla trabajando. Al reconocer que el mismo servicio lo brindan las montañas Catskill, sin costo alguno, los funcionarios decidieron invertir dinero para protegerlas. Entonces se estableció un fondo monetario considerable para apoyar los proyectos que ayudaran a disminuir los escurrimientos agrícolas y a mejorar los sistemas de eliminación de las aguas negras; también se compraron terrenos para detener la urbanización y mantener funcionando los ecosistemas y los servicios de purificación del agua que éstos ofrecen.

30.2 ¿ESTÁ DISMINUYENDO LA BIODIVERSIDAD DE LA TIERRA?

La extinción es un proceso natural, pero las tasas se han elevado de forma alarmante

Los científicos han planteado la hipótesis de que, en ausencia de cataclismos, las extinciones ocurren de manera natural a una tasa muy lenta, llamada *tasa de extinción de fondo*. En contraste, el registro fósil arroja evidencia de cinco vida se erradicaron en un tiempo relativamente corto. La más reciente tuvo lugar hace casi 65 millones de años y puso fin de manera abrupta a la era de los dinosaurios. Se desconocen las causas de las extinciones masivas, pero los cambios ambientales repentinos (como los causados por el impacto de un meteorito inmenso o por variaciones climáticas extremas) son las explicaciones más probables.

La mayoría de los biólogos piensan que las actividades humanas están causando ahora una sexta extinción masiva, que rivaliza con estos sucesos prehistóricos. La minoría piensa que las extinciones causadas por la gente no alterarán sustancialmente la diversidad general de la vida o la forma en que funciona la mayor parte de las comunidades. Algunos consideran con optimismo que se encontrarán las formas de preservar la mayor parte de la biodiversidad existente.

Puesto que nuestro conocimiento de la biodiversidad es limitado, es difícil medir con exactitud las tasas de extinción. Las extinciones de aves y mamíferos están bien documentadas, aunque éstas representan aproximadamente sólo el 0.1 por ciento del total de las especies a nivel mundial. Desde el siglo XVI, hemos perdido cerca del 2 por ciento de todas las especies de mamíferos y el 1.3 por ciento de las especies de aves. A las tasas de extinción de fondo, una especie de ave pudo haberse extinguido cada 400 años; pero en los últimos 400 años, cuando menos 132 especies de aves (y probablemente muchas más) han sido empujadas a la extinción, casi totalmente por las actividades humanas. La Unión Mundial para la Conservación (World Conservation Union, IUCN)* recientemente estimó que la tasa de extinción actual es de 100 a 1000 veces la de la tasa de extinción de fondo calculada en ausencia de gente. Aunque incluso la cifra más conservadora es alarmante, la tasa subraya la incertidumbre de tales estimaciones. Puesto que los científicos han identificado solamente una fracción de la biodiversidad total de la Tierra, con toda segu-

GUARDIÁN DE LA TIERRA Restauración de los Everglades

En 1948 el Congreso de Estados Unidos autorizó el Proyecto para el centro y sur de Florida que proponía construir una serie de canales, diques y otras estructuras con el fin de controlar las inundaciones, irrigar las granjas y suministrar agua potable a nuevos desarrollos urbanísticos de Florida en las extensas tierras pantanosas que predominan en el sur y centro de ese estado. El proyecto también transformaría al sinuoso río Kissimmee, en sus 165 kilómetros, en un canal recto de 90 kilómetros de longitud, eliminando la mayor parte de los pantanos adyacentes (**FIGURA E30-1**). Conforme fueron disminuyendo los Everglades y otras tierras pantanosas en el sur de Florida, fue extinguiéndose también la vida silvestre que dependía de ellas. Las funciones naturales de purificación de las aguas de las tierras pantanosas también se perdieron, y se presentó el problema de la contaminación a medida que surgían nuevas granjas y ciudades. Disminuyeron las plantas, las aves, los peces y otras especies nativas, y al mismo tiempo florecieron especies invasoras. Durante los 50 años siguientes, la gente comprendió el error tan grave que se había cometido. La inmensa diversidad de especies y la riqueza de las interacciones de la comunidad, que había hecho de los Everglades un ecosistema único, se perdieron rápidamente.

Con la mitad del área original de los Everglades convertida en terrenos agrícolas, casas y otras formas de desarrollo económico, los gobiernos de Florida y Estados Unidos aplicaron el Plan para la restauración total de los Everglades, el cual fue aprobado en el año 2000. Este plan de 30 años tiene como objetivo restaurar 46,600 kilómetros cuadrados de pantanos a un costo estimado de $7,800 millones. El plan, que intenta realizar una de las más profundas restauraciones ecológicas en la histo-

a) Río Kissimmee antes de la construcción de canales

b) El mismo río una vez canalizado

FIGURA E30-1 Río Kissimmee de Florida

ridad hemos perdido muchas especies no descritas. Por ejemplo, una nueva especie de delfín, el australiano de nariz respingona, y un nuevo género de mono, el kipunji africano, fueron descubiertos en 2005 (**FIGURA 30-5**). Sólo quedan aproximadamente 1000 individuos de cada especie, y ambas están amenazadas por las actividades humanas, así que fácilmente podrían haberse extinguido antes de ser descubiertas, como sin duda ha sucedido con muchas otras especies.

Cada vez es mayor el número de especies amenazadas por la extinción

La IUCN ha elaborado una "lista roja" que clasifica las especies en peligro de extinción, las cuales pueden describirse como en **peligro crítico de extinción**, **en extinción** o **vulnerables**, dependiendo de la probabilidad que tienen de extinguirse en un futuro cercano. El pájaro carpintero de pico color marfil, por ejemplo, está en peligro crítico de extinción. Las especies que pertenecen a cualquiera de estas tres categorías antes citadas se consideran **amenazadas**. En 2004 la lista roja incluía

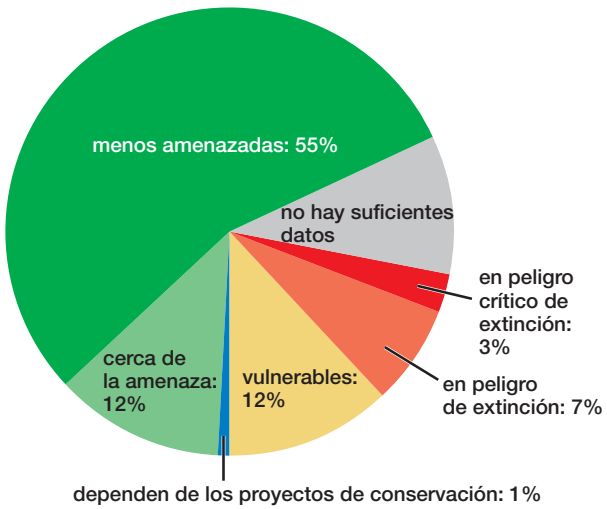

menos amenazadas: 55%
no hay suficientes datos
en peligro crítico de extinción: 3%
en peligro de extinción: 7%
vulnerables: 12%
cerca de la amenaza: 12%
dependen de los proyectos de conservación: 1%

FIGURA 30-6 Clasificación de los mamíferos que hace la IUCN
De las 4776 especies de mamíferos conocidas de la Tierra, aproximadamente el 23 por ciento enfrenta amenaza; un adicional 12 por ciento está "cerca de la amenaza," lo que significa que tales especies están muy cerca de ser clasificadas como "vulnerables". La categoría de "menos amenazadas" (no están amenazadas ni cerca de la amenaza) se aplica a poco más de la mitad de los mamíferos del mundo.

ria, eliminará 385 kilómetros de canales y diques, restablecerá el cauce natural del río, restaurará los pantanos y reciclará aguas negras (**FIGURA E30-2**).

Como resultado de estas medidas de restauración, ahora Florida ha recuperado más de 166 kilómetros cuadrados de pantanos, algunos de los cuales se utilizan como áreas gigantescas para el tratamiento de aguas. Con el tiempo, se recuperarán 75 kilómetros del río Kissimmee. Las poblaciones de aves ya empiezan a abundar a lo largo de las partes restauradas y la calidad del agua ha mejorado.

Este programa de 30 años con un costo de $8 mil millones para enmendar la destrucción humana del ecosistema nos da evidencia de que ya estamos percatándonos de los valores económicos e intrínsecos de las comunidades naturales.

FIGURA E30-2 Restauración de los Everglades
a) Las aves, como esta garza nevada, vuelven a abundar en los segmentos restaurados del río Kissimmee. **b)** Área de Florida que comprende el Plan para la restauración total de los Everglades.

15,589 especies amenazadas, lo que representaba el 12 por ciento de todas las aves, el 23 por ciento de los mamíferos (**FIGURA 30-6**), el 32 por ciento de los anfibios y el 42 por ciento de las tortugas. Tan sólo en Estados Unidos hay 1272 especies en peligro de extinción. Muchos científicos temen que en la actualidad un gran número de especies en peligro ya estén en vías de extinción. ¿Por qué está sucediendo esto?

30.3 ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES AMENAZAS CONTRA LA BIODIVERSIDAD?

Dos factores principales interrelacionados subyacen en la disminución de la biodiversidad a nivel mundial: **1.** el gran incremento de la proporción de los recursos de la Tierra que se emplean para sustentar la vida humana y sus estilos de vida y **2.** el efecto directo de las actividades humanas, como la destrucción de los hábitat y la contaminación, sobre el resto de la vida en la Tierra.

La humanidad está acabando con el "capital ecológico" de la Tierra

La **huella ecológica** del ser humano (véase el capítulo 26) es una estimación del área de la superficie terrestre requerida para producir los recursos que usamos y para absorber los desechos que generamos, expresado en acres de productividad promedio. Un concepto complementario, la **biocapacidad**, estima los recursos sustentables y la capacidad realmente disponible para absorber los desechos en la Tierra. Aunque están relacionados con el concepto de *capacidad de carga* explicado en el capítulo 26, tanto los cálculos de la huella ecológica como la biocapacidad están sujetos a cambios a medida que las nuevas tecnologías influyen en la forma en que la gente utiliza los recursos. A pesar de que los datos están incompletos, los científicos utilizan las mejores estimaciones disponibles, basadas principalmente en los datos estadísticos de las organizaciones internacionales como las Naciones Unidas. Se pretende que los cálculos sean conservadores evitando sobrestimar las repercusiones de las actividades humanas, y no se toma en consideración ningún terreno apartado destinado a proteger la biodiversidad.

¿Cómo se compara la huella de la humanidad con la biocapacidad de la Tierra? En 2002 la biocapacidad disponible por cada 6200 millones de personas de la Tierra era de 4.5 acres (18,211 metros cuadrados), pero la huella humana promedio era de 5.4 acres (21,853 metros cuadrados). En el caso

GUARDIÁN DE LA TIERRA — Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva

El comercio de la carne producto de la cacería en África es un ejemplo primordial de cómo las amenazas a la biodiversidad interactúan y se amplifican. Históricamente, los campesinos africanos han complementado su dieta cazando una variedad de animales que, en conjunto, se conocen como carne de animales salvajes (o *bushmeat*). La cacería tradicional que realizan para subsistir las tribus pequeñas, utilizando armas rudimentarias, no constituye una amenaza seria para los animales. Pero actualmente, como los caminos que se abren para la tala de árboles penetran hasta el interior de las selvas tropicales, los cazadores utilizan escopetas y trampas para matar a cualquier animal que sea lo bastante grande como para comerlo. Las comunidades que se asientan a lo largo de los caminos abiertos por la tala desarrollan una cultura de cazar para vender y llegan a depender de esta nueva y fructífera industria. Los camiones madereros a veces se utilizan para transportar la carne a los mercados urbanos. La Sociedad Mundial para la Conservación estima que la cacería furtiva en África ecuatorial produce más de un millón de toneladas de carne al año. Como muchos de los animales cazados desempeñan un papel importante en la dispersión de las semillas de los árboles, la pérdida de estos animales reduce la capacidad de las selvas taladas para regenerarse.

Pero también la pesca excesiva con fines comerciales en la costa occidental africana constituye una amenaza a la vida salvaje de esa región. Un estudio realizado en 2004 en Ghana documentó un nexo significativo entre la disminución de la captura de peces, el aumento de la captura ilícita en las reservas naturales de Ghana y un incremento en las ventas de carne producto de la cacería furtiva en las aldeas asentadas en las costas. Esto sugiere que la carne de la cacería furtiva ahora está sustituyendo a las proteínas que tradicionalmente se obtenían a partir del consumo de pescado.

Como a los cazadores furtivos no les importa el sexo, la edad, el tamaño o la escasez de los animales, muchas especies amenazadas están disminuyendo rápidamente. Por ejemplo, a pesar de las estimaciones de que sólo entre 2000 y 3000 hipopótamos pigmeos en peligro de extinción viven en estado salvaje, la carne de estos animales se encuentra en los mercados de esas regiones. La carne de elefantes africanos y rinocerontes también se puede encontrar a la venta en los mercados.

Las ganancias que se obtienen a partir de la cacería han ayudado a superar los tabúes tradicionales africanos de no comer la carne de los primates. Aunque una tercera parte de todos los primates (monos, simios, lémures y otros) están en peligro de extinción, en algunos de los mercados que venden carne producto de la cacería furtiva, el 15 por ciento proviene de primates. En Camerún, África, los gorilas en peligro de extinción son el blanco favorito de los cazadores furtivos por su gran tamaño. Aun los amenazados chimpancés y bonobos, nuestros parientes más cercanos, terminan su vida en una olla de cocinar (**FIGURA E30-3**). Las repercusiones que tiene la cacería de primates son difíciles de evaluar porque muchos son tasajeados de inmediato en el sitio donde los matan, y se los comen o los venden en cortes que no permiten identificar a qué animal pertenecen. Los expertos consideran que la cacería furtiva es ahora una amenaza aún mayor que la pérdida de hábitat para los grandes simios africanos; además, la combinación de las amenazas de la cacería furtiva y la pérdida de los hábitat hace que en las regiones salvajes exista una verdadera posibilidad de que se puedan extinguir estas especies tan magníficas e inteligentes.

Al reconocer las amenazas a la vida salvaje, varios países del África central están trabajando para reducir la tala ilegal, así como la cacería furtiva de los animales salvajes. Estos países han establecido un conjunto de áreas protegidas en las selvas tropicales africanas de la cuenca del río Congo. Aunque las enormes compañías madereras continúan establecidas a lo largo de los límites de estas reservas, protegerlas es un paso crucial hacia la preservación de parte de la rica herencia natural de África.

FIGURA E30-3 Cacería furtiva
Los primates están amenazados por los cazadores furtivos que emplean rifles muy potentes.

de los residentes en Estados Unidos, el promedio es de 24 acres (97,125 metros cuadrados). Este hallazgo sugiere que la humanidad ha excedido la capacidad de la Tierra para sostenerla, sobre una base continua, en más del 20 por ciento (**FIGURA 30-7**

países menos desarrollados como India y China (cada uno con una población de más de mil millones) elevan su nivel de vida, los recursos de la Tierra resultan muy afectados.

Tal como se explicará en los siguientes apartados, las actividades humanas están dañando la capacidad de los ecosistemas de todo el mundo para poder continuar sosteniendo la vida humana y otras formas de existencia.

Las actividades humanas amenazan la biodiversidad en varias formas importantes

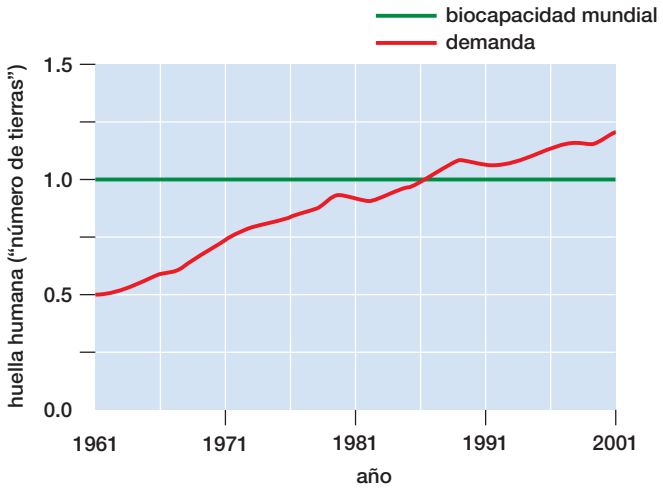


FIGURA 30-7 La demanda humana se excede de la biocapacidad estimada de la Tierra
La proporción estimada de la demanda frente a la biocapacidad de 1961 a 2002 se fijó en 1. La huella ecológica de la humanidad se ha incrementado de manera sostenida durante los últimos 40 años. De acuerdo con estas estimaciones, en 1961 estábamos usando cerca de la mitad de la biocapacidad de la Tierra. Ahora se necesitarían más de 1.2 Tierras para brindar sostén a todos, con los porcentajes actuales de consumo, de una manera sustentable (Modificado de "Humanity's Footprint 1961-2002", Global Footprint Network).

tánea, como se destaca en la sección "Guardián de la Tierra: Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva". Por ejemplo, la pronunciada disminución de las poblaciones de ranas en todo el mundo es el resultado de una combinación de factores como destrucción de hábitat, especies invasoras, contaminación e infecciones provocadas por hongos que muchos expertos consideran vinculadas con el calentamiento global (véase "Guardián de la Tierra: Ranas en peligro" en el capítulo 24). Los arrecifes de coral, que dan abrigo a cerca de una tercera parte de las especies de peces marinos, sufren de una combinación de sobreexplotación, contaminación (incluido el limo que se erosiona de la tierra cercana que ha sido desmontada) y el calentamiento global.

La destrucción del hábitat es la amenaza más grave para la biodiversidad

Desde que la gente empezó a cultivar la tierra, hace unos 11,000 años, nuestro planeta ha perdido aproximadamente la mitad de sus bosques. Pero lo más alarmante es que casi la mitad de todas las selvas tropicales han sido taladas en tan sólo los últimos 50 años. Además de ofrecer madera para su exportación, la tierra de las selvas tropicales se está convirtiendo en vastas extensiones de terrenos agrícolas para abastecer la demanda mundial de carne, café, soya, aceite de palma, caña de azúcar y otros cultivos (**FIGURA 30-8a, b**).

La IUCN ha identificado la destrucción del hábitat como la amenaza principal para la biodiversidad en el mundo, porque los ríos han sido confinados a presas, los pantanos se han desecado, y los pastizales y bosques se han convertido en terrenos para sembrar y para construir carreteras, viviendas e industrias. La pérdida de los hábitat ha puesto en peligro de extinción a más del 85 por ciento de todos los mamíferos, aves y anfibios. Los reptiles, como las tortugas, también se ven amenazados. En Florida los diques construidos para proteger las costas contribuyen a erosionar las playas e impiden que las tortugas lleguen a tierra en busca de un lugar para desovar. En la sección "Guardián de la Tierra: En defensa de las tortugas marinas" te enterarás acerca del programa exitoso e innovador para salvar las tortugas de Sudamérica.

Una amenaza grave para la vida salvaje es la **fragmentación del hábitat**, en la cual los ecosistemas naturales se dividen en

a)

b)

FIGURA 30-8 Destrucción del hábitat
La pérdida del hábitat como resultado de las actividades humanas es la mayor de las amenazas individuales para la biodiversidad en todo el mundo. ***a)*** Tala de árboles en la selva tropical. ***b)*** Esta imagen de plantaciones de soya creadas dentro de la selva tropical en Bolivia fue fotografiada por astronautas desde la Estación Espacial Internacional en 2001.

FIGURA 30-9 Fragmentación del hábitat
Los campos aíslan las manchas boscosas en Paraguay.

pequeños lotes rodeados por regiones destinadas a las actividades humanas (FIGURA 30-9). Algunas especies de aves canoras en Estados Unidos, como el pájaro hornero y el mosquero verdoso, pueden necesitar hasta 2.4 kilómetros cuadrados de bosque continuo para encontrar alimento, una pareja y sitios adecuados para la anidación. El pájaro carpintero de pico color marfil requiere aun una mayor extensión de bosque. Los grandes felinos también se encuentran amenazados por la fragmentación del hábitat. Los jaguares que habitan en las montañas cerca de Los Ángeles y las panteras de Florida con frecuencia mueren atropellados cuando tratan de cruzar alguna de las carreteras que dividen sus hábitat. En la década de 1970, India estableció una serie de reservas forestales con el objetivo de proteger al amenazado tigre de Bengala. Las reservas, originalmente conectadas por medio de bosques, ahora se han convertido en islas en un mar de urbanizaciones, lo que ha forzado a los 5000 tigres que aún sobreviven a confinarse en 160 manchas boscosas aisladas.

La fragmentación de los hábitat puede dar como resultado la formación de poblaciones demasiado pequeñas para sobrevivir. Para que sea funcional, una reservación debe sostener una **población mínima viable** (PMV). Ésta es la población aislada más pequeña que puede persistir a pesar de los sucesos naturales, que incluyen la endogamia, las enfermedades, los incendios y las inundaciones. La PMV para cualquier especie se ve influida por muchos factores, como la calidad del entorno, el tiempo de vida de la especie, su fertilidad y cuántas crías llegan a la edad adulta. Algunos expertos en la vida salvaje piensan que una población mínima viable de los tigres de Bengala debe incluir por lo menos 50 hembras, más de las que se encuentran en muchas reservas de tigres en India.

La sobreexplotación amenaza a muchas especies

La **sobreexplotación**

La pesca excesiva es la mayor amenaza para la vida marina, porque causa una drástica disminución de muchas especies, incluidos el bacalao, el tiburón, la perca roja y el pez espada. La población del atún de aleta azul del Atlántico occidental, un pez de sabor delicioso que alcanza un precio elevado en Japón, ha descendido casi en un 97 por ciento desde 1960. Enormes redes de pesca atrapan intencionalmente grandes cantidades de peces con valor comercial, pero cada año atrapan por accidente cientos de miles de mamíferos marinos, incluidas ballenas, marsopas y delfines, y en particular han puesto en peligro de extinción a 10 especies de delfines. La mayor parte de las especies de tortugas marinas están en peligro debido a la captura excesiva de los ejemplares adultos y de los huevos que se venden como alimento (FIGURA 30-10).

En las poblaciones de crecimiento rápido de los países en desarrollo ha aumentado la demanda de productos animales, ya que la pobreza y el hambre impulsan a la gente a atrapar o recolectar todo lo que se pueda vender o comer, ya sea legal o ilegalmente, sin importar si se trata de especies en peligro. Callum Ranking del Fondo Mundial para la Vida Silvestre, explica lo siguiente: "Es extremadamente difícil lograr que la gente viva de manera sustentable. A menudo sólo se preocupa por tratar de sobrevivir". Para complicar más los problemas, los consumidores ricos incrementan la demanda de animales en peligro de extinción pagando precios elevados por productos ilegales como el marfil de los colmillos de elefante, los cuernos de rinoceronte y las aves exóticas de las selvas tropicales. La demanda de madera en los países desarrollados fomenta la tala inmoderada de árboles de los bosques y de las selvas tropicales; de hecho, menos del 1 por ciento de la madera de la selva es talada de manera sustentable.

Las especies invasoras desplazan a la vida salvaje y desorganizan las interacciones de las comunidades

Los seres humanos han transportado a una multitud de especies alrededor del mundo, ganado al Continente Americano y secuoyas a Inglaterra, por ejemplo. En muchos casos, las especies introducidas a un lugar no provocan mayores daños. Sin embargo, en ocasiones las especies no nativas se convierten en *invasoras*: aumentan en número a expensas de las especies

FIGURA 30-10 Sobreexplotación
Huevos de tortuga verde recogidos de manera ilegal se venden en un mercado de Borneo.

Las tortugas más grandes de la Tierra están en problemas, porque seis de las siete especies de tortugas marinas están amenazadas o en peligro crítico de extinción. Las tortugas marinas no comienzan a procrear sino hasta que tienen entre 30 y 50 años de edad. Entonces deben que nadar casi 2900 kilómetros para llegar a los terrenos de desove, probablemente las mismas playas donde fueron incubadas. Arrastrándose hasta la playa, las hembras excavan un agujero en la arena, depositan sus huevos y regresan al mar (**FIGURA E30-4a**). Las crías salen del nido después de dos meses e inician su penoso viaje hacia la adultez. Las aves marinas y los cangrejos las atacan cuando emprenden su corta travesía hacia el océano (**FIGURA E30-4b**). Una vez en el agua, las tortugas son un apetitoso blanco para la gran variedad de peces. Aunque relativamente pocas alcanzan la edad de procrear, en condiciones naturales sobrevivirían las suficientes como para conservar la población de tortugas. Por desgracia, las playas donde desovan las tortugas atraen a recolectores furtivos que localizan a las hembras que están desovando y entonces los huevos son presa fácil. La carne y los huevos de tortuga son un manjar para mucha gente, con sus caparazones se pueden hacer hermosas piezas de joyería, y con su piel se confeccionan elegantes prendas. También se capturan las tortugas adultas, tanto deliberada como accidentalmente, con anzuelos y redes. A los turistas les atrae ir a las playas donde desovan las tortugas, pero esto asusta a las hembras en fase de procreación. Como las hembras requieren de un tipo específico de arena para desovar, aumentar el espacio y la cantidad de arena de playa para los turistas (como se hace frecuentemente en Florida) evita que las tortugas desoven. Las luces intensas de los desarrollos turísticos cerca de las playas desorientan a las tortugas cuando intentan regresar al mar.

Desde 1980, la organización TAMAR, orientada a la conservación de las tortugas, ha reducido estas amenazas para las cinco especies de tortugas marinas que desovan a lo largo de las costas de Brasil, y ha llegado a ser un modelo de conservación integral en todo el mundo (**FIGURA E30-4c**). Los fundadores de TAMAR se percataron de que los pescadores y lugareños deberían participar en este esfuerzo o, de lo contrario, el proyecto fracasaría. Ahora, la mayoría de sus empleados son pescadores. Antes mataban a las tortugas marinas, pero ahora liberan a las que atrapan en sus redes y patrullan las playas durante la temporada de desove. Los biólogos de TAMAR colocan identificaciones a las hembras y así pueden seguir el rastro de sus travesías. Los pescadores mantienen a raya a los furtivos cazadores de tortugas (ahora escasos), identifican los nidos que están en sitios riesgosos y reubican los huevos en playas más seguras o en criaderos cercanos, en los cuales se lleva un conteo de las crías; cada año, TAMAR ayuda a cerca de 350,000 crías para que lleguen con seguridad al mar.

TAMAR ha tenido éxito porque, en vez de simplemente prohibir la cacería de tortugas, los organizadores del proyecto han incluido a las comunidades locales en calidad de socios para protegerlas. El dinero fluye hacia las economías locales porque los ecoturistas acuden en masa a ver a las tortuguitas, visitan los museos marinos, compran recuerdos hechos por los residentes de la localidad y aprenden acerca de este programa. TAMAR patrocina jardines de la comunidad, centros de cuidado diurno y actividades educativas para el cuidado del ambiente. La organización ha creado también islas flotantes artificiales que atraen peces para los pescadores, de manera que no sientan la necesidad de matar tortugas marinas. Al admitir que los beneficios económicos derivados de la preservación de las tortugas son bastante superiores a la suma de dinero que puede obtenerse si se les caza, los residentes locales participan de buen grado en la conservación de las tortugas. El éxito de TAMAR no solamente subraya la necesidad de contar con el respaldo comunitario para el uso sustentable de cualquier recurso natural, sino que destaca el éxito de la integración de los esfuerzos.

FIGURA E30-4 Tortugas marinas en peligro
a) Una tortuga verde hembra cava la arena con sus poderosas aletas para hacer una cavidad donde enterrará aproximadamente 100 huevos. ***b)*** Después de incubar en la arena durante casi dos meses, las crías rompen el cascarón y salen del huevo. Aquí una cría se dirige al mar, donde (si llega a sobrevivir) pasará de 25 a 50 años antes de alcanzar la madurez sexual. ***c)*** Las 22 estaciones de TAMAR (destacadas en azul) ayudan a las tortugas a lo largo de toda la costa de Brasil.

nativas, con las que compiten directamente por alimento, hábitat o por las presas (véase el capítulo 27). Con frecuencia, las especies introducidas hacen más vulnerables a la extinción a las especies nativas por otras causas, como las enfermedades o la destrucción del hábitat. Aproximadamente 7000 especies invasoras se han establecido en Estados Unidos, y casi la mitad de las especies amenazadas sufren a causa de la competencia o la depredación por parte de las especies invasoras.

Las especies que habitan en islas son particularmente vulnerables. Las poblaciones isleñas son pequeñas, muchas especies son únicas y no tienen otro lugar a donde ir si las condiciones cambian. Por ejemplo, el 99 por ciento de las 414 plantas de Hawai en riesgo y el 98 por ciento de sus 42 poblaciones de especies de aves amenazadas están en peligro de extinción a causa de las especies invasoras. Las mangostas (**FIGURA 30-11a**) fueron importadas deliberadamente en el siglo XIX **FIGURA 30-11b**), introducida en el lago Victoria en la década de 1950 como alimento para el ser humano, amenaza con extinguir aproximadamente a 200 especies.

La contaminación es una amenaza de múltiples facetas para la biodiversidad

La contaminación tiene muchas formas. Los contaminantes incluyen las sustancias químicas sintéticas como los plastificantes, retardadores del fuego y pesticidas que van a dar al aire, suelo y agua, y luego se acumulan hasta alcanzar niveles tóxicos en los tejidos animales. Algunos de estos tóxicos son perturbadores endocrinos, los cuales interfieren con el desarrollo normal o con la reproducción. Las amenazas graves resultan también de las sustancias naturales que se liberan en grandes cantidades en forma no natural. Algunas —como el mercurio, plomo y arsénico liberados por los trabajos de minería y de fabricación— resultan directamente tóxicas, tanto para el hombre como para la vida silvestre. Los nutrimentos en cantidades excesivas también llegan a ser contaminantes. Por ejemplo, la quema de combustibles fósiles libera óxidos de nitrógeno y de azufre, que alteran los ciclos biogeoquímicos naturales de los nutrimentos para las plantas, lo que origina la lluvia ácida que amenaza bosques y lagos (véase el capítulo 28).

El calentamiento global es una nueva amenaza para la biodiversidad

La quema de combustibles fósiles, aunada a la deforestación, ha incrementado de manera sustancial los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. Tal como predijeron los expertos en climatología, este aumento se ha visto acompañado de un incremento general de las temperaturas globales. En respuesta al calentamiento global, las especies están cambiando sus hábitat más hacia los polos, las plantas y los animales están iniciando sus actividades primaverales más pronto de lo normal en el año, mientras que los glaciares y los casquetes de hielo se están derritiendo (véase el capítulo 28). Algunos meteorólogos sostienen la hipótesis de que el calentamiento global está ocasionando también cambios extremos en el estado del tiempo, como ondas cálidas, sequías, inundaciones, huracanes y tormentas de mayor intensidad.

El ritmo tan acelerado de los cambios climáticos causados por el hombre es un desafío a la capacidad de las especies para adaptarse a través de la selección natural. Recientemente, el biólogo experto en conservación de especies, Chris Thomas, quien trabaja a nivel mundial con otros 18 científicos en 6 regiones ricas en biodiversidad, llegó a la conclusión de que el calentamiento global es actualmente una amenaza tan grave para la biodiversidad como la destrucción directa de los hábitat. Thomas y sus colaboradores estiman que aproximadamente un millón de especies estarán en peligro de extinción en el año 2050 como resultado del calentamiento global y de las numerosas alteraciones provocadas por el cambio climático de la Tierra.

a)

b)

FIGURA 30-11 Especies invasoras

La mangosta, importada de India para acabar con las ratas, amenaza con exterminar las aves que anidan en el suelo en Hawai. ***b)*** La perca del Nilo, introducida en el lago Victoria por los pescadores, resultó una verdadera amenaza para los peces nativos.

30.4 ¿CÓMO PUEDE AYUDAR LA BIOLOGÍA DE LA CONSERVACIÓN A PRESERVAR LA BIODIVERSIDAD?

Fundamentos de la biología de la conservación

Las cuatro metas importantes de la biología de la conservación son las siguientes:

- Comprender los efectos de las actividades humanas sobre las especies, poblaciones, comunidades y ecosistemas.
- Preservar y restaurar las comunidades naturales.
- Revertir la pérdida acelerada de la biodiversidad de la Tierra causada por las actividades humanas.
- Fomentar el uso sustentable de los recursos de la Tierra.

La biología de la conservación incorpora los principios filosóficos y éticos de que la biodiversidad tiene un valor intrínseco y que otras formas de vida tienen el derecho de existir, independientemente de su valor para los seres humanos. En consecuencia, debemos tratar de evitar la extinción causada por el hombre de las especies individuales. Otro principio importante es que las complejas relaciones entre los organismos, que han evolucionado durante milenios, deben preservarse dentro de sus ambientes naturales.

La biología de la conservación tiene también la meta práctica de sostener el bienestar humano mediante la comprensión y la protección del ambiente natural. Reconoce que los seres humanos, al igual que otras formas de vida, evolucionaron dentro del ambiente y dependen de los servicios que éste les brinda.

La biología de la conservación es una ciencia integrada

La biología de la conservación aplica el conocimiento de diversas disciplinas para preservar las especies y fomentar la supervivencia de las poblaciones sanas, autosustentables y genéticamente diversas dentro de las comunidades naturales.

Dentro del amplio campo de la biología de la conservación, el esfuerzo desplegado para preservar las especies concentra la ayuda por parte de los ecólogos, administradores de la vida salvaje, genetistas, botánicos y zoólogos. Pero la conservación efectiva también depende de la experiencia y el apoyo de la gente ajena a las actividades de la biología de la conservación, lo cual incluye a funcionarios del gobierno de todos los niveles, quienes establecen la política y las leyes ambientales; los abogados relacionados con el ambiente que ayudan a hacer cumplir las leyes que protegen las especies y sus hábitat; y los economistas ecológicos, quienes ayudan a establecer el valor de los servicios de los ecosistemas. Además, los científicos sociales aportan su conocimiento sobre las formas en que los diversos grupos culturales utilizan el ambiente. Los educadores ayudan a los estudiantes a comprender cómo funcionan los ecosistemas, cómo sostienen la vida humana y cómo la gente puede alterarlos o preservarlos. Las organizaciones dedicadas a la preservación de especies identifican las áreas problemáticas, ofrecen material educativo y organizan el apoyo fundamental por parte de los individuos. Finalmente, las preferencias y acciones individuales determinan en última instancia si ha tenido éxito el esfuerzo desplegado para lograr la preservación.

Preservación de los ecosistemas salvajes

a diferentes retos de supervivencia. Las reservas núcleo, conectadas por medio de corredores de vida salvaje, son formas muy exitosas para preservar los ecosistemas naturales y sus diversas comunidades, incluidas las especies que están en peligro de extinción.

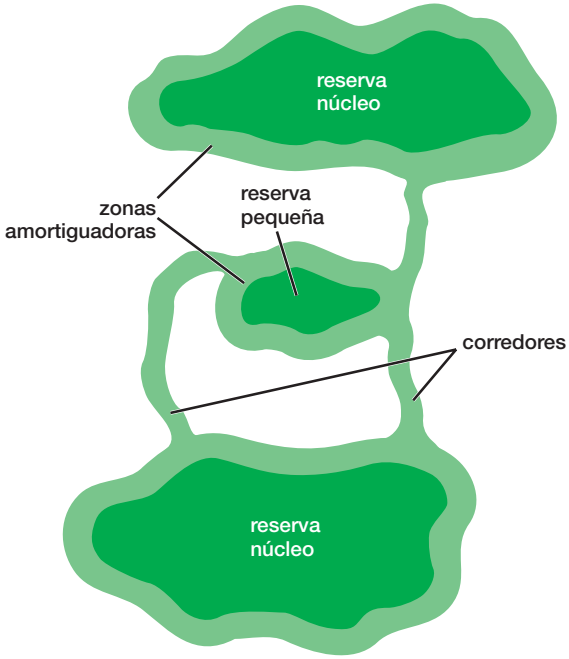
Las reservas núcleo preservan todos los niveles de biodiversidad

Las **reservas núcleo** son áreas naturales protegidas contra la mayoría de los usos que podrían darles los humanos, excepto para la recreación de muy bajo impacto. Estas reservas abarcan suficiente espacio para preservar los ecosistemas con toda su biodiversidad. En la sección "Guardián de la Tierra: Recuperación de un depredador clave", se explica cómo al volver a introducir a los lobos en el Parque Nacional Yellowstone, una reserva núcleo en Wyoming, están mejorando otras poblaciones y se restauran muchas interacciones de las comunidades. Como las tormentas, los incendios y las inundaciones naturales son importantes para mantener los ecosistemas, las reservas núcleo deben ser lo bastante grandes como para permitir estos sucesos sin que se pierdan especies.

Para establecer reservas núcleo efectivas, los expertos en conservación deben conocer las *áreas críticas mínimas* necesarias para sostener las poblaciones mínimas viables de las especies que requieren el mayor espacio. Las áreas críticas mínimas varían de manera significativa entre las especies, pero, para una especie determinada, tales áreas dependen también de la disponibilidad de alimento, agua y refugio. El área crítica mínima requerida para mantener una población mínima viable de jaguares en el sur de California, por ejemplo, se estima en aproximadamente 2000 kilómetros cuadrados.

Los corredores conectan los hábitat fundamentales de los animales

En nuestro mundo actual tan poblado, una reserva núcleo individual a menudo no es lo suficientemente grande como para



GUARDIÁN DE LA TIERRA — Recuperación de un depredador clave

Un animal se considera un *depredador clave* cuando sus actividades de cacería ejercen un efecto importante sobre la estructura de la comunidad de un ecosistema. Las investigaciones realizadas en el Parque Nacional Yellowstone en el oeste de Estados Unidos (**FIGURA E30-5a**) documentan las complejas interrelaciones dentro de esta comunidad natural y el papel fundamental que desempeña un depredador clave: el lobo. Considerado como una amenaza para las manadas de alces y bisontes, los lobos fueron exterminados de forma deliberada en Yellowstone en 1928. Con base en la información recabada y las fotografías aéreas, los investigadores han determinado que este suceso marcó el comienzo del fin para la regeneración de los álamos temblones (**FIGURA E30-5b**). Las poblaciones de álamos, donde se refugia una diversidad de comunidades de plantas y aves, han descendido en un 95 por ciento desde que se abrió el parque en 1872. Recientes investigaciones sugieren que el alce, la presa mayor de los lobos, se alimenta de casi todos los álamos temblones jóvenes, así como de los sauces y de los álamos americanos.

De 1995 a 1996, después de varios años de planeación, estudios y debates públicos, la dependencia el Servicio de Peces y Vida Silvestre de Estados Unidos capturó 21 lobos grises en Canadá, los llevó al Parque Nacional Yellowstone y ahí los puso en libertad (**FIGURA E30-5c**). Los lobos están prosperando y ahora su número ha aumentado a 250 ejemplares. Muchos ecólogos están convencidos de que la introducción de este depredador clave ha ejercido un efecto favorable y de largo alcance en el ecosistema de Yellowstone.

Un estudio reciente por parte de los ecólogos William Ripple y Eric Larsen sugiere que la depredación del lobo no solamente controla la cantidad de alces, sino que también modifica el comportamiento de éstos. Cuando los lobos merodean, los alces no se acercan a los álamos temblones, sauces y álamos americanos que se encuentran en las orillas de los arroyos, donde son menos capaces de ver a los lobos o de escapar ante un ataque sorpresivo. Ahora, puesto que los alces ya no se acercan a los árboles, estas comunidades de plantas se están regenerando y ofrecen más hábitat para las aves canoras, así como mejores condiciones en los arroyos para las truchas. Como estos árboles prosperan, los castores regresaron y han construido pequeñas represas en los arroyos, lo que propicia la formación de pantanos, hábitat adecuados para los visones, las ratas almizcleras, las nutrias, los patos y los extraños sapos boreales. Las plantas suculentas que crecen en los pantanos hechos por los castores son el alimento favorito de los osos pardos cuando salen de su estado de hibernación. Estos osos también se alimentan de los restos de alces que dejan los lobos, al igual que las águilas doradas y las águilas calvas. En un giro posterior de la intrincada red de interacciones de la comunidad, los lobos compiten y matan a los coyotes, los cuales se comen a los roedores. Como las poblaciones de roedores están aumentando, los zorros rojos que se alimentan de roedores están proliferando y los biólogos temen que abundarán otros depredadores pequeños como las comadrejas y los glotones.

Algunos ecólogos, al notar la complejidad de las interacciones de las especies, señalan de manera correcta que el "efecto lobo" necesita más tiempo y estudio antes de delinear una conclusión definitiva. Pero hasta ahora la evidencia sugiere que, como indica el administrador del Proyecto de restauración del lobo, Douglas Smith, "los lobos son para Yellowstone lo que el agua es para los Everglades de Florida".

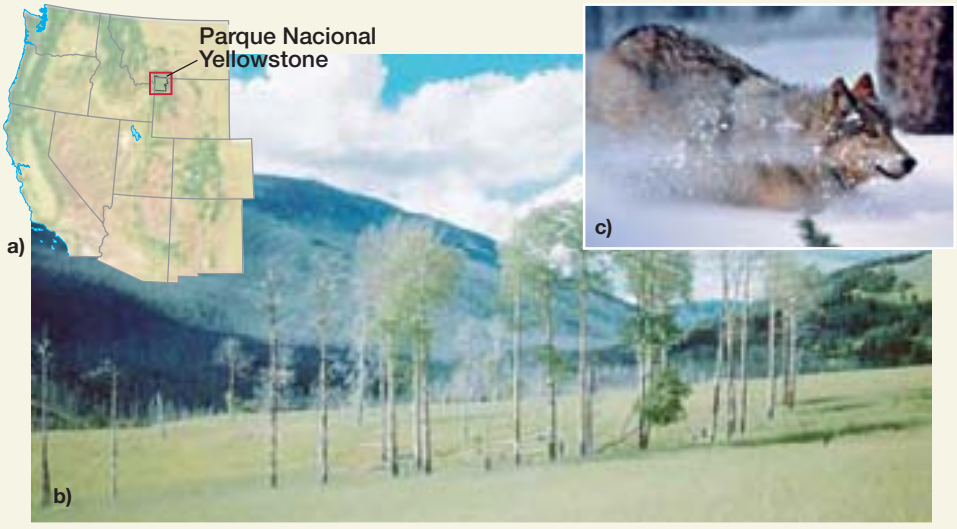


FIGURA E30-5 Impacto de un depredador clave
a) Ubicación del Parque Nacional Yellowstone. ***b)*** Los remanentes de lo que alguna vez fueron zonas arboladas de álamos en el Parque Nacional Yellowstone son testigos de la falta de regeneración desde principios del siglo xx. (Fotografía cortesía del doctor William Ripple). ***c)*** Los lobos ahora deambulan por Yellowstone, deleitan a los visitantes y ejercen efectos positivos de largo alcance sobre la comunidad natural.

mantener por sí sola la biodiversidad y las complejas interacciones de las comunidades. Los **corredores de vida salvaje**, los cuales son franjas de terreno protegidas que unen las reservas núcleo, permiten a los animales desplazarse libremente y con seguridad entre hábitat que, de otra forma, estarían aislados (**FIGURA 30-12**). Al conectar los corredores aumenta efectivamente el tamaño de las reservas pequeñas. Tanto las reservas núcleo como los corredores, de manera ideal, están rodeados por zonas amortiguadoras que sustentan las actividades humanas compatibles con la vida salvaje. Las zonas amortiguadoras evitan las actividades de gran impacto sobre el ambiente como tala, minería y construcción de carreteras y viviendas, para que no interfieran con la vida salvaje de la región núcleo.

En Costa Rica el gobierno y las organizaciones dedicadas a la conservación ofrecen incentivos fiscales, conocidos como *derechos de conservación*, para los propietarios de hábitat en riesgo que los protegen de las actividades humanas. Este programa ha impulsado a muchos ciudadanos a participar en la creación de corredores de vida salvaje conectados con las áreas

protegidas. El ecoturismo de bajo impacto que tiene lugar justo afuera de estos corredores capta los ingresos tan necesarios para las comunidades locales.

Un corredor de vida salvaje puede ser tan angosto como el paso debajo de una carretera. Por ejemplo, en el sur de California tan densamente poblado, se abandonaron planes para construir más de 1000 nuevas casas cerca de San Diego y se cerraron las salidas a la carretera después de que los biólogos expertos en la vida salvaje descubrieron a un jaguar que estaba usando el paso subterráneo de Coal Canyon para desplazarse entre hábitat adecuados. Ahora, un corredor oficial de la vida salvaje, el paso subterráneo y sus alrededores están siendo restaurados para darles una apariencia más natural, lo que animará a los jaguares y otros animales salvajes a cruzar sin ningún temor por debajo de la carretera (**FIGURA 30-13**).

En las montañas Rocallosas del norte una coalición de grupos conservacionistas y científicos propuso la creación de una serie de corredores para la vida salvaje con el fin de unir las reservas núcleo ya existentes, como el Parque Nacional Yellowstone, con los ecosistemas cercanos. Tales hábitat interconectados sostendrían a las poblaciones de osos pardos, alces y pumas.

30.5 ¿POR QUÉ LA SUSTENTABILIDAD ES LA CLAVE DE LA CONSERVACIÓN?

La vida y el desarrollo sustentables estimulan el bienestar ecológico y de la humanidad a largo plazo

Los ecosistemas naturales comparten ciertos "principios de operación", que son violados frecuentemente por el desarrollo humano no sustentable. La sustentabilidad requiere de cuatro importantes características:

- Diversas comunidades con riqueza de interacciones comunitarias
- Poblaciones relativamente estables que permanezcan dentro de la capacidad de carga del ambiente
- Reciclado y uso eficiente de las materias primas
- Aprovechamiento de fuentes de energía renovables

En la sustentabilidad es primordial el respeto a los principios operativos de la naturaleza. En el trascendental documento *Who Will Care for the Earth?* (*¿Quién cuidará de la Tierra?*), la IUCN afirma que el **desarrollo sustentable** "satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades". Y especifica:

> La humanidad ya no debe tomar de la naturaleza más de lo que ésta pueda reabastecer. Esto, a la vez, significa que hay que adoptar los modos de vida y las vías de desarrollo que respeten y trabajen dentro de los límites de la naturaleza. Lo anterior puede lograrse sin rechazar los numerosos beneficios que ha traído consigo la tecnología moderna, siempre y cuando esa tecnología trabaje también dentro de tales límites.

La pesca comercial es un ejemplo primordial del trabajo de la tecnología fuera de los límites de la naturaleza. Con el uso del sonar, de enormes redes de pesca y de arrastre que son capaces de arrasar comunidades enteras del lecho marino, los pescadores comerciales han capturado mucho más de lo que la naturaleza puede reabastecer, poniendo en peligro de extinción tanto a las especies comerciales como a las no comerciales. La pesca sustentable exige preservar los sitios de desove, limitar la captura de peces y mejorar la tecnología para evitar los daños no intencionados.

Por desgracia, en la sociedad humana moderna, el "desarrollo sustentable" es casi una contradicción, porque "desarrollo" a menudo significa remplazar los ecosistemas naturales con infraestructura humana, como sucede cuando se construyen viviendas. Tradicionalmente, muchos economistas y hombres de negocios han insistido en que sin el crecimiento continuado, la humanidad no puede prosperar. Desde luego, la gente de los países "desarrollados" ha logrado crecimiento económico y un elevado nivel de vida. Pero han logrado esto

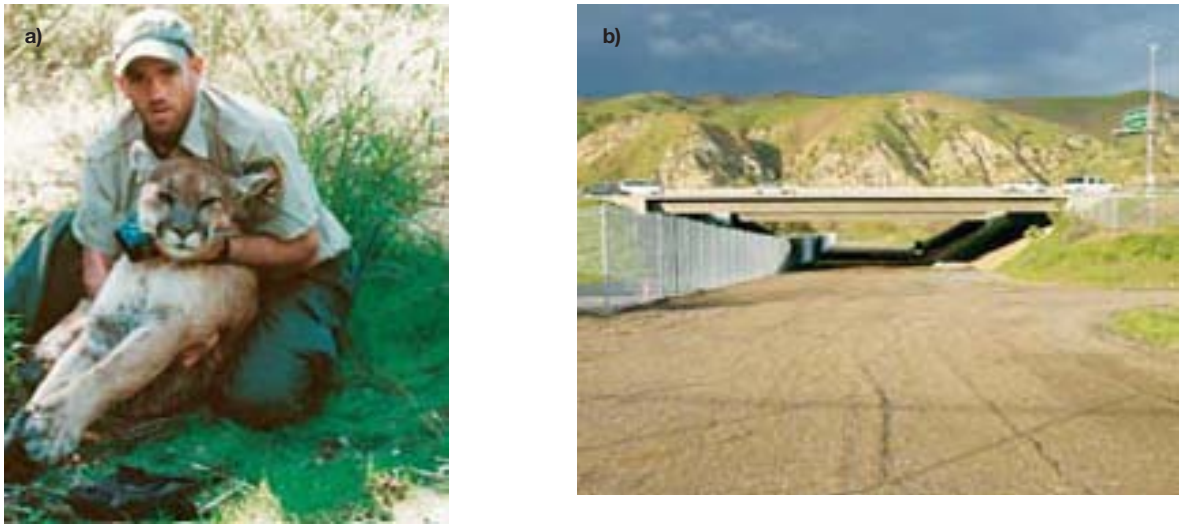


FIGURA 30-13 Corredores para la vida salvaje
a) Los biólogos del Servicio de Parques Nacionales identifican y siguen la pista a los jaguares por medio de una laminilla de identificación que les colocan en la oreja y collares para localizarlos por medio de un sistema de posicionamiento global (GPS). Aquí se observa a uno de los biólogos con un jaguar sedado. ***b)*** El asfalto ha sido removido y el tráfico está prohibido en el paso a desnivel en el cañón Coal, debajo de la carretera de Riverside cerca de San Diego, para permitir que los jaguares se desplacen libremente entre hábitat situados a uno y otro lado.

explotando de una manera no sustentable los servicios directos e indirectos que brindan de forma gratuita los ecosistemas; además, han utilizado grandes cantidades de energía no renovable.

Sin embargo, ahora la evidencia proveniente de todas partes del mundo muestra que las actividades responsables de tal crecimiento están desenredando la compleja red de las comunidades naturales y socavando la capacidad de la Tierra para sustentar la vida. A medida que los individuos y los gobiernos reconocen la necesidad del cambio, surge una gran cantidad y variedad de proyectos cuya intención es satisfacer las necesidades humanas de forma sustentable. En los siguientes apartados describiremos algunos de esos proyectos.

Las reservas de la biosfera ofrecen modelos para la conservación y el desarrollo sustentable

Una red mundial de **reservas de la biosfera** lanzó un programa conocido con el título de El hombre y la biosfera, bajo los auspicios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU). La meta de las reservas de la biosfera es conservar la biodiversidad y evaluar las técnicas para un desarrollo humano sustentable, y al mismo tiempo preservar los valores culturales locales. El proyecto Reservas de la biosfera abarca tres regiones. Una *reserva núcleo*, la cual, en tanto que está protegida, permite la investigación y a veces el turismo y algunos usos culturales tradicionales sustentables. Una *zona amortiguadora* circundante que permite las actividades humanas y el desarrollo de bajo impacto. Fuera de esta zona amortiguadora se encuentra el *área de transición*, la cual es flexible en tamaño y uso, apoya los asentamientos, el turismo, la pesca y la agricultura, todo esto (de manera ideal) operado con sustentabilidad (**FIGURA 30-14**). La primera reserva de la biosfera fue designada a fines de la década de 1970 y actualmente existen 480 de estos sitios en todo el mundo.

Las reservas de la biosfera son totalmente de carácter voluntario y están administradas por los países y zonas regionales donde se ubican. Esto ha reducido considerablemente la gran oposición a ellas, pero como resultado de su carácter voluntario, pocas se apegan por completo al modelo ideal de reservas de la biosfera. En Estados Unidos la mayoría de las 47 reservas núcleo son parques y bosques nacionales. Buena parte de los terrenos de las zonas amortiguadoras y de transición son de propiedad privada, y algunos de los terratenientes pueden no estar al tanto de su designación. A menudo, los fondos monetarios son inadecuados para poder compensarlos por las restricciones al desarrollo, y para promover y coordinar el desarrollo sustentable, particularmente en las zonas de transición.

La reserva de la biosfera del desierto de Chihuahua es una reserva regional innovadora establecida en 1977 y consiste en tres reservas separadas dentro de ese desierto. En conjunto, estas zonas satisfacen el criterio mínimo de la ONU (**FIGURA 30-15**). El Parque Nacional Big Bend, en Texas, sirve como la zona de "reserva núcleo protegida", que brinda apoyo a la investigación y al turismo, pero no al desarrollo privado. La porción conocida como la Jornada de la reserva, ubicada en Nuevo México, es considerada como la "zona amortiguadora". Aquí, los científicos investigan la administración sustentable de las tierras en los ecosistemas secos. En México, la reserva Mapimí sirve como "área de transición". Más de 70,000 personas viven en esta reserva, y los científicos están trabajando con ellas para animarlas a que se dediquen a labores agrícolas más sustentables y a que conserven las especies del desierto como la tortuga Bolson, el reptil terrestre más grande de Norteamérica, que está en peligro de extinción. Los científicos tienen ahora la esperanza de reintroducir esta especie en el parque nacional Big Bend y de establecer corredores de vida salvaje para unir estas reservas separadas.

Las reservas de la biosfera se han encontrado con los mismos obstáculos que enfrentan la mayor parte de los esfuerzos para preservar la biodiversidad y cambiar la forma en que la gente utiliza los recursos naturales; sin embargo, ahora están teniendo éxito de forma gradual. El concepto ofrece un modelo elegante de conservación en el contexto del desarrollo sustentable y constituye el marco para los esfuerzos en ese sentido tanto presentes como futuros.

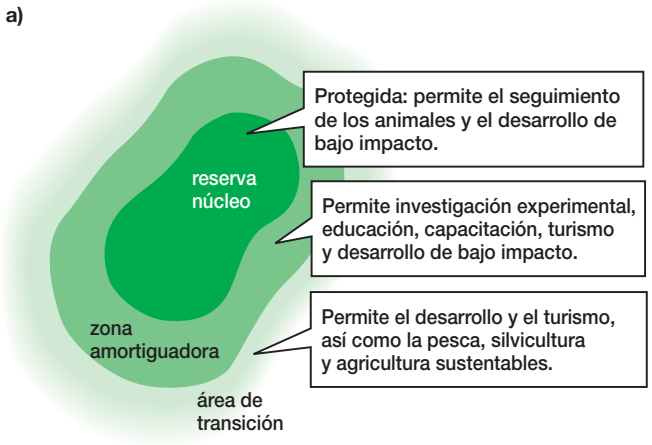

a)
reserva núcleo
zona amortiguadora
área de transición
Protegida: permite el seguimiento de los animales y el desarrollo de bajo impacto.
Permite investigación experimental, educación, capacitación, turismo y desarrollo de bajo impacto.
Permite el desarrollo y el turismo, así como la pesca, silvicultura y agricultura sustentables.

FIGURA 30-15 Una reserva de biosfera regional única
Esta reserva regional dentro del desierto de Chihuahua (en color café) consiste en tres reservas similares (en verde) en Estados Unidos y México.

La agricultura sustentable ayuda a preservar las comunidades naturales

La pérdida más grande de un hábitat ocurre cuando la gente convierte los ecosistemas naturales en monocultivos, lo que significa que grandes extensiones de tierra se dedican a un solo cultivo. En la región central norte de Estados Unidos, los pastizales naturales originales se destinaron casi en su totalidad a labores agrícolas. La agricultura es necesaria para alimentar a la humanidad, y los agricultores tienen que enfrentarse a la presión de producir grandes cantidades de alimento al costo más bajo posible. En algunos casos, esto ha conducido a unos enfoques agrícolas no sustentables que interfieren con los servicios de los ecosistemas. Por ejemplo, dejar que las tierras estén barbechadas (ociosas) después de levantada la cosecha permite la erosión de las tierras fértiles. Se ha encontrado que un herbicida, utilizado comúnmente para eliminar la maleza en los sembradíos, es un potente perturbador endocrino, y los insecticidas que se emplean de manera indiscriminada exterminan no sólo a las plagas sino también a sus depredadores naturales. En muchas regiones del mundo los sistemas de irrigación están acabando con los mantos acuíferos subterráneos con más rapidez de la que pueden reabastecerse por medio de los procesos naturales.

Por fortuna, los agricultores ya están reconociendo que la agricultura sustentable ahorra dinero y al mismo tiempo conserva las tierras (tabla 30-1). La técnica de **sembrar sin labrar** (conocida en inglés como *no-till*), que deja los residuos de las cosechas recolectadas en las tierras para que formen paja y hojas para el cultivo del año siguiente, representa un componente de la agricultura sustentable. En Estados Unidos ahora se emplea en el 20 por ciento de los sembradíos, lo cual ahorra a los agricultores más de 1200 millones de litros de combustible anualmente en comparación con los métodos de cultivo convencionales. Desde 1980, esta práctica ha ayudado a reducir la erosión del suelo aproximadamente en un 30 por ciento.

La mayoría de los agricultores que utilizan esta técnica usan herbicidas para aniquilar el cultivo de cobertura y la maleza (FIGURA 30-16) y otros pesticidas para controlar la aparición de hongos e insectos. Muchos agricultores dedicados a los productos orgánicos emplean la técnica de sembrar sin labrar, y también evitan utilizar herbicidas, insecticidas o fertilizantes sintéticos. La agricultura orgánica depende de los depredadores naturales para controlar las plagas y de los microorganismos de la tierra para descomponer los desechos animales y de la cosecha, de manera que los nutrimentos se reciclan. Diversos cultivos reducen la aparición de las plagas y enfermedades que atacan a un solo tipo de plantas, y la labor agrícola de sembrar sin labrar protege las tierras.

En contraste con las "granjas fábrica", que dedican cientos o incluso miles de acres a un solo cultivo, las granjas orgánicas tienden a ser pequeñas. Puesto que la pérdida de los servicios del ecosistema no está considerada en los costos de las prácticas agrícolas no sustentables, el alimento producido en tales condiciones tiende a ser más barato, al menos a corto plazo. Así, los consumidores que desean apoyar la agricultura sustentable deben estar preparados para pagar un poco más por los alimentos producidos de esta manera. Aunque sólo aproximadamente el 0.5 por ciento de tierra de cultivo en Estados Unidos está dedicada a los productos orgánicos, la demanda de los consumidores está impulsando un crecimiento firme de este método sustentable. Muchos proyectos, como el Programa de investigación y educación para la agricultura sustentable de la Universidad de California, apoyan la investigación y educación de los agricultores y del público en general acerca de las ventajas de la agricultura sustentable y cómo practicarla. En la sección "Guardián de la Tierra: Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra", aprenderás acerca de una forma de la agricultura tropical sustentable.

El futuro está en tus manos

El crecimiento de la población humana no es sustentable

Las causas fundamentales de la degradación ambiental son simples: demasiada gente utiliza muchos recursos y genera demasiados desechos. Las soluciones, por desgracia, son complejas. El desarrollo sustentable busca el progreso hacia una buena calidad de vida, incluida una alimentación y prendas de vestir adecuadas, aire y agua limpios, buena atención médica, buenas condiciones de trabajo, oportunidades de educación y de ejercer una profesión, así como el acceso a ambientes naturales sin deteriorarlos. La mayoría de los habitantes de la Tierra viven en países en desarrollo y carecen de por lo menos algunas de estas comodidades básicas (FIGURA 30-17). La ONU estima que más de 850 millones de personas (casi una de cada siete) carecen de la alimentación adecuada.

Las discusiones sobre la sustentabilidad y preservación de la biodiversidad con frecuencia parecen evadir un hecho que

FIGURA 30-16 Sembradíos sobre terrenos sin labrar
a) Un cultivo de cobertura de trigo se elimina con un herbicida antes de cosechar el grano. Las plantas crecidas de semillas de algodón prosperan entre el trigo muerto, anclan el suelo y reducen la evaporación. ***b)*** Más tarde en la temporada, el mismo campo muestra una sana cosecha de algodón que crece sobre la paja del trigo muerto.

Tabla 30-1 Las prácticas agrícolas afectan la sustentabilidad

	Agricultura no sustentable	Agricultura sustentable
Erosión del suelo	Permite la erosión del suelo mucho más aprisa de lo que puede recuperarse, porque se labra sobre los restos de las cosechas, dejando el suelo expuesto hasta que crecen los nuevos cultivos.	La erosión se reduce considerablemente por la agricultura de sembrar sin labrar. La erosión por el viento disminuye plantando hileras de árboles a modo de rompevientos alrededor de los campos.
Control de plagas	Usa grandes cantidades de pesticidas para controlar las plagas.	Los árboles y arbustos cerca de los campos dan hábitat a las aves que comen insectos y a los insectos depredadores. Reducir el uso de insecticidas ayuda a proteger a los pájaros y a los depredadores de insectos.
Uso de fertilizantes	Usa grandes cantidades de fertilizantes sintéticos.	La agricultura de sembrar sin labrar conserva el suelo rico en nutrimentos. Los desechos animales se usan como fertilizantes. Las leguminosas que reabastecen los suelos con nitrógeno (como la soya y la alfalfa) se alternan con las cosechas que agotan el nitrógeno del suelo (como el maíz y el trigo).
Calidad del agua	Los escurrimientos del suelo desnudo contaminan el agua con pesticidas y fertilizantes. Cantidades excesivas de desechos animales se drenan de los comederos.	Los desechos animales se usan para fertilizar los campos. La planta de cobertura que deja la agricultura de sembrar sin labrar reduce el escurrimiento de nutrimentos.
Irrigación	Puede irrigar demasiado los cultivos, suministrando agua bombeada de depósitos subterráneos con mayor rapidez de la que se puede recuperar por la lluvia o nieve.	La moderna tecnología de irrigación reduce la evaporación y suministra el agua sólo en el momento y el lugar en que se necesita. La agricultura de sembrar sin labrar reduce la evaporación.
Diversidad de cultivos	Depende de un número pequeño de cosechas de altos ingresos, lo cual causa la aparición de insectos o enfermedades en las plantas que se combaten con grandes cantidades de pesticidas.	Al alternar las cosechas y plantar una variedad más amplia de cultivos se reduce más la aparición de insectos y enfermedades.
Uso de combustibles fósiles	Usa grandes cantidades de combustibles fósiles no renovables para el equipo agrícola y para producir y aplicar fertilizantes y pesticidas.	La agricultura de sembrar sin labrar disminuye la necesidad de arar y fertilizar.

no tiene escapatoria. Tal como se especifica en el documento de la IUCN *¿Quién cuidará de la Tierra?*, un tema central es "cómo lograr el equilibrio de las poblaciones humanas con los ecosistemas que las sostienen". Por medio de los adelantos tecnológicos y el derroche del capital ecológico de la Tierra, hemos logrado una población que rebasa considerablemente este equilibrio. Por si fuera poco, actualmente agregamos de 75 a 80 millones de personas al planeta cada año. Este crecimiento es incompatible con un aumento sustentable de la calidad de vida para los 6500 millones de personas que ya estamos aquí preservando lo que queda de la biodiversidad de la Tierra para las futuras generaciones.

Los cambios en los estilos de vida y el empleo de las tecnologías apropiadas también son esenciales

FIGURA 30-17 Pobreza
Miles de millones de personas carecen de los recursos necesarios para llevar una buena calidad de vida. Este asentamiento en Ciudad Juárez, México, está precisamente cruzando la frontera con El Paso, Texas (ambas poblaciones se encuentran dentro del desierto de Chihuahua que se muestra en la figura 30-15).

GUARDIÁN DE LA TIERRA Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra

Vistas desde corta distancia, las "rústicas" plantaciones de café mexicano no se diferencian de las selvas tropicales. El café es uno de los pocos cultivos que pueden crecer a la sombra (el cacao, con el que se fabrica el chocolate, es otro). Las plantaciones rústicas a menudo consisten en una selva tropical casi intacta con docenas de especies de árboles que forman un dosel hasta de 20 metros de altura (**FIGURA E30-6**). Los árboles protegen el suelo de la erosión, atrapan el agua y humedecen el aire, creando así una sombra fresca que reduce el crecimiento de la maleza. Los árboles también sirven de hogar para más de 150 diferentes especies de aves. Las aves se alimentan de las diversas comunidades de insectos que habitan tanto en los árboles como en el suelo húmedo creado por las especies que se encargan de descomponer las hojas que han caído al suelo. Los arbustos que crecen hasta la altura de la cintura de un hombre continúan produciendo granos de café en este ambiente sombreado durante casi 30 años.

El café puede crecer también a plena luz del Sol, lo que aumenta su producción. Desde principios de la década de 1970, se ha tratado de abrir grandes claros en la selva para el monocultivo del café. En Colombia casi el 70 por ciento de las plantaciones de café crecen ahora a plena luz del Sol. Al carecer de los nutrimentos que se obtienen por la descomposición de la selva, estas granjas requieren de grandes cantidades de fertilizantes a un precio elevado. El suelo soleado y fertilizado, así como la ausencia de depredadores naturales favorecen el crecimiento de la maleza y de los insectos que llegan a convertirse en plagas, las cuales tienen que controlarse por medio de herbicidas e insecticidas. La cantidad de especies de aves se reduce hasta en un 95 por ciento en este ambiente artificial, porque se envenenan con los pesticidas y se les priva de su hábitat y de los insectos que constituyen su alimento. Como las plantaciones de café y otras actividades han reducido los doseles de árboles que cubren las selvas tropicales durante los últimos 30 años, ha habido una reducción en las poblaciones de las aves nativas y de las que procrean en Norteamérica pero que pasan el invierno en las selvas tropicales de Centro y Sudamérica. Éstas incluyen tordos madereros, cazamoscas, tanagras escarlatas, vireos, currucas y colirrojos.

Estados Unidos consume más de la tercera parte del café producido en el mundo, y dos terceras partes de esa cantidad se cultivan en Latinoamérica y el Caribe. Por fortuna, la mayor parte del café que se cultiva en México, y más de la mitad del que se cultiva en Costa Rica, proviene de plantaciones a la sombra. Los árboles que forman el pabellón ofrecen también una fuente de alimento o de ingresos por los cítricos, plátanos, guayabas y maderas que producen. Los importadores y consumidores de café están descubriendo gradualmente la importancia que tienen estas plantaciones tradicionales en la conservación de la biodiversidad, en particular de las aves migratorias. El Centro Smithsoniano de Aves Migratorias certifica las plantaciones de café como Bird Friendly™ (amigables con las aves) si cumplen con los altos estándares para la diversidad de las selvas tropicales. La Alianza de las Selvas Tropicales certifica que el café se produjo de forma sustentable por medio del sello de aprobación Rainforest Alliance Certified. El elevado precio de estos cafés refleja el valor de los servicios del ecosistema que conservan, pero los bebedores de café exigentes consideran también que el sabor y el aroma agregados de los cafés cultivados a la sombra compensan su precio más alto.

FIGURA E30-6 Las plantaciones rústicas de café preservan la biodiversidad
Domingo Silva practica la agricultura sustentable en su plantación de café a la sombra en Oaxaca, México. Esta granja, la cual ha pertenecido a su familia durante cuatro generaciones, produce una variedad de frutas así como granos de café. (Imagen en recuadro) Los granos de café son uno de los pocos cultivos que prosperan a la sombra.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO DE REGRESO DE LA EXTINCIÓN

La escasez de árboles longevos y de larvas de escarabajos que habitan en ellos significa que para que una pareja de pájaros carpinteros de pico color marfil pueda procrear, en condiciones ideales, se requieren hasta 15.5 kilómetros cuadrados de bosque sin talar. Pero en los bosques tan destruidos que ahora existen, una pareja de estas aves podría requerir de 50 a 78 kilómetros cuadrados para obtener sus recursos adecuados. Nadie sabe si todavía existe siquiera una pareja capaz de reproducirse en Big Woods, pero los investigadores la están buscando con gran interés y cuidado. Los ornitólogos que fueron los primeros en localizar a este pájaro carpintero mantuvieron en secreto su descubrimiento durante más de un año, pues temían que, al hacer pública la información, los aficionados a la observación de la vida de las aves invadirían el lugar, de manera que realizaron expediciones y reunieron evidencias de manera subrepticia. Cuando las noticias sobre este descubrimiento llegaron a los diarios, el Servicio de Peces y Vida Silvestre de Estados Unidos restringió el acceso a los aproximadamente 20 kilómetros cuadrados adyacentes al sitio donde se había visto al pájaro carpintero, y permitió la entrada sólo a unos cuantos investigadores. Sin embargo, mucho de lo que queda de Big Woods está abierto al público. Aunque muchos amantes de las aves, atraídos por la posibilidad de ver aunque sea una vez en la vida a este pájaro carpintero, algunos otros se preocupan tanto por la supervivencia de esta ave que están decididos a ya no molestarlo. Al describir al pájaro carpintero de pico color marfil como un "símbolo de la vida salvaje," un amante de las aves, expresó: "En realidad no necesito verlo o tomarle fotografías, sólo me basta con saber que se encuentra ahí".

Piensa en esto ¿Qué hace que la gente se preocupe tanto por este pájaro al cual quizá nunca verán? ¿Por qué otros se preocupan tan poco que, al igual que los propietarios de los aserraderos que destruyeron el último hábitat de los pájaros carpinteros de pico color marfil, parecieran deseosos de que se extingan?

ENLACES CON LA VIDA ¿Qué pueden hacer los individuos?

No hay pasajeros en la nave espacial llamada Tierra. Todos formamos parte de la tripulación.

—Marshall McLuhan

La vida sustentable es, a final de cuentas, una ética que debe invadir todos los niveles de la sociedad humana, comenzando por los individuos. El adagio de "Reduce, reutiliza y recicla" es un consejo excelente para minimizar las repercusiones sobre los sistemas que sustentan la vida sobre la Tierra. De estas "tres R", la más importante es la reducción del consumo. He aquí algunas formas de lograrlo:

CONSERVA LA ENERGÍA

- **Calentamiento y enfriamiento:** No calientes tu casa a más de 20°C en el invierno y gradúa el aire acondicionado por debajo de 25°C en el verano. Apaga el sistema de calefacción o de aire acondicionado cuando salgas de casa. Cuando te mudes a una casa o vayas a remodelarla, considera las características que economizan energía como el calentamiento por medio de la luz solar, un buen aislamiento, ventilador en el ático, ventanas con doble vidrio (con recubrimiento de "baja energía" para disminuir la transferencia de calor) y un buen aislamiento para el invierno. Planta árboles caducifolios en el lado sur de tu casa para que den sombra en el verano y sol en el invierno. Si es posible, compra energía renovable del proveedor.
- **Agua caliente:** Date un baño breve y limpia los orificios de la ducha. Utiliza la lavadora y el lavavajillas sólo con cargas completas; emplea agua fría para lavar la ropa; no enjuagues la vajilla para quitarle los restos de comida antes de lavarla. Baja la temperatura al calentador de agua.
- **Aparatos domésticos:** Compara la escala de graduaciones al comprar un aparato grande. No uses la secadora en el verano, coloca la ropa a secar en un cordel. Apaga las luces y aparatos que no estés usando. Remplaza las bombillas incandescentes por fluorescentes o LED cuando sea posible.
- **Transportación:** Escoge el automóvil que ahorre más gasolina y que satisfaga tus necesidades, y úsalo de manera eficiente haciendo todas tus diligencias de una sola vez. Usa los transportes públicos, o ponte de acuerdo con los vecinos para alternar el uso de los automóviles; camina, usa la bicicleta, o emplea la computadora para comunicarte, siempre que sea posible.

CONSERVA LOS MATERIALES

- **Recicla:** Ve cuáles son las opciones de reciclado en tu comunidad, y recicla todo lo que acepten. Investiga sobre la preparación de composta (hay excelentes sitios al respecto en Internet). Los residuos de fruta, vegetales, hojas y césped pueden proteger y fertilizar tus plantas. Apoya y anima a tu escuela y a tu comunidad para que reciclen.
- **Compra material reciclado:** Compra productos de papel reciclado. Las botellas de plástico se reciclan para fabricar alfombras y pisos.
- **Reutiliza:** Reutiliza todo lo que sea posible, como sobres y carpetas para archivar documentos; utiliza las hojas de papel por ambos lados. Vuelve a llenar el botellón de agua. Reutiliza las bolsas del supermercado. Regala, en vez de tirar, la ropa que esté en buen estado, así como juguetes y muebles. Haz trapos de limpiar con la ropa vieja y úsalos en vez de tratarlos como material de limpieza desechable.
- **Conserva el agua:** Si vives en una zona seca, planta alrededor de tu casa vegetación que resista la sequía para reducir el empleo de agua.

APOYA LOS HÁBITOS SUSTENTABLES

- **Elección de alimentos:** Compra productos orgánicos cosechados en la localidad para que no tengas que ir más lejos. Busca el café que haya sido cosechado a la sombra, ya sea que tenga el sello de aprobación Bird-Friendly ™ o Rainforest Alliance Certified y pídelo en la cafetería local. Disminuye el consumo de carne, en especial de res. Consulta la "lista de pescados" en http://thefishlist.org para hacer elecciones amigables con el océano al comprar productos del mar.
- **Limita el uso o evita el empleo de sustancias químicas dañinas:** Los limpiadores, insecticidas y herbicidas fuertes contaminan el agua y el suelo.

REDOBLA TUS ESFUERZOS

- **Apoya los esfuerzos organizados para la conservación:** Únete a grupos que trabajan para la conservación del ambiente y dona dinero para sus proyectos. Puedes encontrarlos en Internet; solicita por correo electrónico información acerca de la legislación ambiental que te facilite ponerte en contacto con tus representantes locales para expresarles tus puntos de vista. Una opción recomendable de consulta es http://www.energyaction.net/main/, el sitio de una coalición de más de 40 organizaciones de Norteamérica que se ocupan de orientar a los jóvenes en el uso de energía limpia.
- **Voluntariado:** Unirse a los esfuerzos básicos para cambiar el mundo es el comienzo de todo. Puedes trabajar como voluntario en proyectos de tu plantel educativo y comunidad para mejorar el ambiente.
- **Haz que tu voto cuente:** Investiga lo que ofrecen los candidatos a cargos públicos y sus antecedentes relacionados con asuntos de conservación; considera esta información al hacer tu elección de voto.
- **Educa:** Por medio de tus palabras y acciones, comparte tu preocupación por la sustentabilidad con tu familia, amigos y comunidad. Escribe cartas al editor del periódico local o de tu escuela, a los hombres de negocios de la localidad y a los funcionarios del gobierno. Investiga la forma en que tu escuela puede economizar energía, recluta a otros estudiantes interesados en la conservación y procura dar a conocer a los demás cómo es posible hacer cambios positivos.
- **Reduce el crecimiento poblacional:** Considera las consecuencias de la enorme expansión de la población humana cuando pienses en cuántos hijos vas a tener. Por ejemplo, la adopción permite a la gente tener familias grandes, al tiempo que se contribuye al bienestar de la humanidad y del ambiente.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

30.1 ¿Qué es la biodiversidad y por qué debemos cuidarla?
La biodiversidad incluye la diversidad genética, la diversidad de especies y la diversidad de interacciones comunitarias. Es una fuente de bienes, como alimento, combustible, materiales de construcción y medicamentos. La biodiversidad hace posibles los servicios del ecosistema, como la formación del suelo, la purificación del agua, el control de las inundaciones, la moderación del clima, el suministro de reservas genéticas y oportunidades para la recreación. La nueva disciplina llamada economía ecológica intenta medir la contribución de los bienes del ecosistema y los servicios a la economía, y estima los costos de perderlos como consecuencia de un desarrollo no sustentable.

30.2 ¿Está disminuyendo la biodiversidad de la Tierra?
Las comunidades naturales tienen antecedentes de una baja tasa de extinciones. Muchos biólogos piensan que las actividades humanas actualmente están causando una extinción masiva, lo que incrementa la tasa de extinciones por un factor de 100 a 1000. Cerca de 15,600 plantas y animales ahora están en peligro de extinción.

30.3 ¿Cuáles son las principales amenazas contra la biodiversidad?
El uso de los recursos naturales por parte de los seres humanos ha excedido la capacidad de la Tierra para reabastecerse de lo que se toma de ella. Al excederse la biocapacidad de la Tierra, se está dañando su capacidad para sustentar la vida futura. Las amenazas principales para la biodiversidad incluyen la destrucción del hábitat y la fragmentación que se producen cuando los seres humanos utilizan los ecosistemas; la sobreexplotación de animales salvajes y plantas silvestres que sobrepasa su capacidad de regeneración; la contaminación, incluido el calentamiento global; y la introducción de especies invasoras.

Web tutorial 30.1 Destrucción y fragmentación del hábitat

30.4 ¿Cómo puede ayudar la biología de la conservación a preservar la biodiversidad?
La biología de la conservación trata de identificar la diversidad de la vida, explorar el efecto de las actividades humanas sobre los ecosistemas naturales y aplicar este conocimiento para preservar las especies y fomentar la supervivencia de las comunidades sanas y autosustentables. Está basada en la premisa de que la biodiversidad tiene un valor intrínseco. La biología de la conservación integra el conocimiento de muchas ramas de la ciencia y requiere de los esfuerzos de funcionarios del gobierno, abogados especializados en asuntos ambientales, organizaciones dedicadas a la conservación y, lo que es más importante, de los individuos. Los esfuerzos para la conservación incluyen establecer reservas para la vida salvaje conectadas por corredores, con la finalidad de preservar las comunidades funcionales y las poblaciones autosustentables.

30.5 ¿Por qué la sustentabilidad es la clave de la preservación?
El desarrollo sustentable satisface las necesidades del presente sin comprometer el futuro. Requiere que la gente mantenga la biodiversidad, recicle la materia prima y dependa de los recursos renovables. Las reservas de la biosfera favorecen la conservación y el desarrollo sustentable. Es crucial un cambio hacia la agricultura sustentable para conservar los suelos y el agua, disminuir la contaminación y el uso de la energía, así como preservar la biodiversidad.

El crecimiento de la población humana no es sustentable y está conduciendo a la desaparición de los recursos más allá de la capacidad de la naturaleza para reabastecerse. Debemos coordinar nuestra población con la capacidad de la Tierra para sustentarnos, dejando espacio y recursos para todas las formas de vida. Los individuos deben hacerse responsables de los cambios y reducir el consumo de los recursos de forma que no se excedan de lo que la Tierra puede suministrar.

TÉRMINOS CLAVE

biocapacidad *pág. 617*
biodiversidad *pág. 612*
biología de la conservación *pág. 612*
corredores para la vida salvaje *pág. 624*
desarrollo sustentable *pág. 625*
especies amenazadas *pág. 616*
especies en peligro crítico de extinción *pág. 616*
especies en peligro de extinción *pág. 616*
especies vulnerables *pág. 616*
extinción masiva *pág. 615*
fragmentación del hábitat *pág. 619*
huella ecológica *pág. 617*
población mínima viable (PMV) *pág. 620*
reservas de la biosfera *pág. 626*
reservas núcleo *pág. 623*
sembrar sin labrar *pág. 627*
servicios del ecosistema *pág. 612*
sobreexplotación *pág. 620*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Define la biología de la conservación. ¿Cuáles son algunas de las disciplinas que abarca, y cómo contribuye cada una de ellas?
2. ¿Cuáles son los tres niveles diferentes de la biodiversidad y por qué es importante cada uno?
3. ¿Qué es la economía ecológica? ¿Por qué es importante?
4. Haz una lista de los tipos de bienes y servicios que ofrecen los ecosistemas naturales.
5. ¿Cuáles son los cuatro tipos de amenazas específicas a la biodiversidad que se describieron en este capítulo? Da un ejemplo de cada uno.
6. ¿Por qué el proyecto TAMAR es un buen modelo para la conservación de las tortugas y el desarrollo sustentable?
7. ¿Cómo puede ayudar a preservar la vida salvaje en Estados Unidos la importación de café cultivado de manera rústica en Latinoamérica?
8. ¿Qué es la cacería furtiva? ¿Qué tipos de animales están particularmente en peligro por causa de ésta? ¿Qué tipos de desarrollo la promueven? ¿Qué factores impulsan este desarrollo?
9. ¿Qué tipos de evidencia apoyan la hipótesis de que el lobo es una especie clave en el Parque Nacional Yellowstone?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

¿Cuáles son los fundamentos éticos de la biología de la conservación? ¿Estás de acuerdo con ellos? ¿Por qué?

Haz una lista de las razones por las que las huellas ecológicas de los residentes de Estados Unidos son, por mucho, las más grandes del mundo. Al analizar tu propia vida, ¿cómo podrías reducir el tamaño de tu huella ecológica? ¿Cómo se extiende en los trópicos la huella ecológica de los residentes de Estados Unidos?

Busca y describe algunos ejemplos de la destrucción del hábitat, de la contaminación y de especies invasoras en la región que está alrededor de tu hogar o del lugar donde estudias. Pronostica cómo lo anterior podría afectar a poblaciones locales específicas de animales y plantas nativos.

Identifica una población suburbana densa cerca de tu hogar o escuela. Rediséñala para que sea sustentable (esto podría ser un buen proyecto en equipo).

5. ¿Cuáles son los argumentos económicos que podrían esgrimir los agricultores convencionales contra el cambio hacia las técnicas de cultivo de productos orgánicos y otras técnicas agrícolas sustentables? ¿Cuáles serían las ventajas para los agricultores? ¿Cómo afecta esto a los consumidores?
6. Algunos funcionarios del gobierno de Estados Unidos están fomentando el uso de combustibles biológicos (gasolina complementada con aceite de palma o de soya, o etanol) para disminuir la dependencia de las importaciones de petróleo. Discute el uso de los combustibles biológicos desde tantos puntos de vista como sea posible.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Daly, H. E. "Economics in a Full World". *Scientific American*, septiembre de 2005. Debemos pensar en nuevas formas de desarrollar una economía sustentable.

Fitzpatrick, J. W. *et al.* "Ivory-billed Woodpecker (*Campephilus principalis*) Persists in Continental North America". *Science,* 3 de junio de 2005. El artículo de la investigación original que informa sobre el redescubrimiento del pájaro carpintero de pico color marfil.

Graham-Rowe, D. y Holmes, B. "Goodbye Cruel World". *New Scientist*, 20 de noviembre de 2004. La pérdida de las especies está correlacionada con el crecimiento de la población humana y la cacería furtiva.

Graham-Rowe, D. y Holmes, B. "The World Can't Go on Living Beyond Its Means". *New Scientist*, 2 de abril de 2005. De acuerdo con la *Evaluación del ecosistema del milenio*, publicado en 2005, aproximadamente el 60 por ciento de los servicios de los ecosistemas están sufriendo degradación.

Groom, M. J., Meffe, G. K. y Carroll, C. R. *Principles of Conservation Biology*, tercera edición, Sinauer Associates, 2006. Un texto de introducción que ofrece una cobertura amplia y diversa de esta disciplina de rápido desarrollo.

Levy, S. "A Top Dog Takes Over". *National Wildlife*, agosto/septiembre de 2004. Explora el efecto de largo alcance de la reintroducción del lobo en el Parque Nacional Yellowstone.

Lovins, A. "More Profit with Less Carbon". *Scientific American*, septiembre de 2005. El ahorro en el consumo de energía permite ahorrar dinero al consumidor, aumentar las utilidades de los negocios y disminuir el calentamiento global.

Milius, S. "Comeback Bird". *Science News*, 11 de junio de 2005. La asombrosa historia del redescubrimiento del pájaro carpintero de pico color marfil.

Musser, G. "The Climax of Humanity". *Scientific American*, septiembre de 2005. Nuestras elecciones durante las siguientes décadas podrían conducirnos a un desarrollo sustentable o a un colapso ambiental.

Pimm, S. L. "Sustaining the Variety of Life". *Scientific American*, septiembre de 2005. Cómo salvar la biodiversidad dentro del presupuesto.

Tangley, L. "Out of Sync". *National Wildlife,* abril/mayo de 2005. El calentamiento global está alterando los ciclos vitales de muchos animales y plantas.